



HAL
open science

Modèles scientifiques scolaires de l'énergie au cycle 4

Estelle Tison

► **To cite this version:**

Estelle Tison. Modèles scientifiques scolaires de l'énergie au cycle 4. Enseignement de la physique [physics.ed-ph]. Cergy Paris CY Université, 2023. Français. NNT: . tel-04681803

HAL Id: tel-04681803

<https://hal.science/tel-04681803v1>

Submitted on 30 Aug 2024

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

CY Cergy Paris Université

ED Éducation, Didactique et Cognition (627)

Laboratoire de Didactique André Revuz (EA 4434)

Modèles scientifiques scolaires de l'énergie au cycle 4

Une analyse de documents institutionnels et de pratiques
déclarées et effectives de formation continue

Par Estelle TISON

Thèse de doctorat de didactique des disciplines – didactique de la physique

Dirigée par Emmanuel ROLLINDE

Présentée et soutenue publiquement le 21 décembre 2023

Devant un jury composé de :

Mme Cécile de Hosson – Professeure des Universités, Université Paris Cité, *présidente du jury*

Mme Isabelle Kermen – Professeure des Universités, Université de Bretagne Occidentale, *rapporteuse*

Mme Valérie Munier – Professeure des Universités, Université Montpellier, *rapporteuse*

Mme Karine Bécu-Robinault – Maîtresse de Conférences HDR, ENS de Lyon, *examinatrice*

M. Damien Grenier – Professeur des Universités, ENS Rennes, *examineur*

M. Konstantinos Ravanis – Professor, University of Patras, *examineur*

M. Emmanuel Rollinde – Professeur des Universités, CY Cergy Paris Université, *directeur de thèse*

À Zélie,

À celles et ceux qui l'ont gardée pendant ces longues heures où je travaillais.

Remerciements

Ce travail de thèse n'aurait pas vu le jour sans le soutien indéfectible de Fabienne, à qui j'adresse mes tous premiers remerciements. Sans elle, il se serait également achevé avec moins de sérénité.

Merci à Emmanuel Rollinde, qui a su m'accompagner dans ce travail et ses réorientations multiples, me soutenir, m'encourager, me pousser à toujours approfondir mes réflexions et me dépasser.

Je remercie Evelyne Clément, Karine Bécu-Robinault et Aude Caussarieu qui, en tant que membres de mon comité de suivi de thèse, ont su apporter un regard particulier sur mon travail et élargir mes réflexions.

Je remercie également les membres de mon jury de thèse – Cécile de Hosson, Isabelle Kermen, Valérie Munier, Karine Bécu-Robinault, Damien Gernier et Konstantinos Ravanis.

Ce travail de recherche s'est déroulé au cours des années 2019 à 2023 : il a été impacté par les restrictions sanitaires liées à la pandémie de Covid-19. Je remercie les membres du LDAR, qui ont fait de leur mieux pour que la vie scientifique, sociale et humaine du laboratoire perdure pendant cette période (en particulier, les responsables successifs du groupe des jeunes chercheurs et Karine, qui a initié les rencontres informelles entre jeunes chercheurs).

Je remercie également les enseignants et les formateurs qui ont été interrogés au cours de mes quatre années de recherche, et en particulier celles et ceux qui ont accepté ma présence – et celle de ma caméra – pendant leurs stages de formation.

Merci à celles et ceux qui m'ont ouvert les portes de leurs bureaux, à Rouen comme à Paris, et m'ont permis d'y travailler dans des conditions plus que satisfaisantes.

Je remercie également, sans les nommer pour être sûre de ne pas en oublier, ma famille élargie et mes amis, pour leur soutien sans faille à ce travail qu'ils me voyaient mener (sans toujours bien comprendre ce qu'il signifiait).

Merci à EL et à GM pour leur patience – et pour leurs relectures.

Résumé

Titre : Modèles scientifiques scolaires de l'énergie au cycle 4 – Une analyse de documents institutionnels et de pratiques déclarées et effectives de formation continue

Mots-clefs : énergie ; modèle scientifique scolaire ; modélisation ; formation

Depuis les années 1970, l'énergie a donné lieu à de nombreux travaux de recherche en didactique qui ont mis en évidence des difficultés relatives à l'enseignement et à l'apprentissage de ce concept. En France, en 2015, l'énergie est devenue un thème d'enseignement à part entière au cycle 4. Des entretiens exploratoires montrent une hétérogénéité dans l'appropriation de ce thème par les enseignants et, en particulier, une grande diversité dans l'utilisation des chaînes énergétiques, qui ne comportent pas de normes communes.

Dans ce travail de recherche, nous caractérisons les modèles scientifiques scolaires de l'énergie promus par des acteurs institutionnels susceptibles d'influencer les pratiques enseignantes, d'une part par une analyse de documents institutionnels (programmes, documents d'accompagnement et manuels), d'autre part par une analyse de pratiques déclarées et effectives de formation continue à l'enseignement de l'énergie (entretien avec des formateurs académiques et analyse de deux stages de formation). Nous nous intéressons particulièrement à la place des chaînes énergétiques dans ces modèles, à leur utilisation dans un contexte de classe et de formation, et aux raisons pouvant expliquer les choix de modèles et de formation effectués par les formateurs.

Pour répondre à nos questions de recherche, nous avons composé un cadre théorique et méthodologique inspiré de la DADE (Robert et Rogalski, 2002) qui s'articule autour de trois approches : une approche didactique, qui permet de caractériser les tâches de formation et d'enseignement ; une approche épistémologique, qui permet de caractériser les modèles scientifiques scolaires de l'énergie ; une approche ergonomique, qui permet d'inférer les raisons qui justifient les choix de modèles et de tâches.

L'analyse des documents institutionnels ne nous a pas permis de mettre en évidence un modèle scientifique scolaire de l'énergie unique et clair : les caractéristiques attribuées à l'énergie ne sont, le plus souvent, pas définies et, lorsqu'elles le sont, leurs définitions peuvent être contradictoires entre elles. La plupart des modèles décrits n'opèrent pas de distinction entre l'énergie associée aux systèmes d'étude et l'énergie reçue ou donnée par ces systèmes, de ce fait la représentation des phénomènes par des chaînes énergétiques ne répond pas à des règles de modélisation claires. Les liens entre concept scientifique scolaire d'énergie et concept sociétal d'énergie ne sont généralement pas faits, et les modèles identifiés ne permettent pas de discuter des questions sociétales liées à l'énergie sous un angle scientifique. Les formateurs qui mobilisent un modèle scientifique scolaire de l'énergie soulignent les difficultés liées à l'enseignement et à l'apprentissage de l'énergie, et évoquent la nécessité d'un consensus concernant les mots du modèle et la méthodologie de modélisation. Cependant, les modèles qu'ils promeuvent ne reposent pas sur des règles communes et ne s'appuient pas sur les mêmes caractéristiques de l'énergie. Un stage de formation se distingue par l'utilisation d'un modèle scientifique scolaire de l'énergie issu de la didactique, qui repose sur la distinction entre formes d'énergie et transferts d'énergie, et sur l'utilisation de chaînes énergétiques.

Abstract

Title: School Science Models in Lower Secondary Education (grade 7 to 9)

Keywords: Energy; School Science Model; Modelling; Training

Since the 1970s, energy has given rise to numerous research studies in didactics which have highlighted difficulties related to the teaching and learning of this concept. In France, in 2015, energy became a teaching theme in *cycle 4* (grade 7 to 9). Exploratory interviews show heterogeneity in the appropriation of this theme by teachers and a great diversity in the use of energy chains, which are not based on common standards.

In this research work, we characterize school science models of energy promoted by institutional actors likely to influence teaching practices, on the one hand through an analysis of institutional documents (programs, official documents and textbooks), on the other hand by an analysis of declared and actual practices of in-training service (interviews with academic trainers and analysis of two training sessions). We particularly focus on the place of energy chains in these models, on their use in a classroom and training context, and on the reasons that can explain the choices of models and training made by trainers.

To answer our research questions, we composed a theoretical and methodological framework inspired by the DADE (Robert and Rogalski, 2002) which is structured around three approaches: a didactic approach, to characterize training and teaching tasks; an epistemological approach, to characterize academic scientific models of energy; an ergonomic approach, to infer the reasons which justify the choices of models and tasks.

The analysis of institutional documents did not highlight a single and clear school science model of energy: the characteristics attributed to energy are, most often, not defined and when they are their definitions may be contradictory to each other. Most of the models described do not make a distinction between the energy associated with the systems of study and the energy received or given by these systems, therefore the representation of phenomena by energy chains does not respond to clear rules of modelling. The links between the school science concept of energy and the societal concept of energy are generally not made, and the models we identified do not permit to discuss societal issues from a scientific angle. Trainers who use a school science model of energy highlight the difficulties linked to teaching and learning about energy, and refer to the need for consensus regarding the words of the model and the modeling methodology. However, the models they promote are not based on common rules and do not rely on the same characteristics of energy. A training course is distinguished by the use of a school science model of energy from didactics, which is based on the distinction between forms of energy and energy transfers, and on the use of energy chains.

Remerciements.....	5
Résumé.....	6
Abstract.....	7
Introduction.....	13
Genèse.....	13
Entretiens exploratoires.....	14
Structure du manuscrit.....	20

PREMIÈRE PARTIE : CONTEXTUALISATION ET ANCRAGE SCIENTIFIQUE

1. D'un concept à un modèle scientifique scolaire.....	25
1.1. Concept et théorie.....	25
1.2. Modèles et modèles scientifiques.....	27
1.3. Modèle scientifique scolaire.....	28
1.4. Conclusion.....	31
2. L'énergie : un concept et une grandeur scientifiques.....	33
2.1. La thermodynamique, science des transferts d'énergie.....	33
2.2. L'énergie dans les autres domaines scientifiques.....	38
2.3. Quels choix pour parler de l'énergie, vue comme un concept unificateur ?.....	43
2.4. Conclusion.....	45
3. Vers un modèle scientifique scolaire initial de l'énergie.....	47
3.1. L'énergie : définitions et caractéristiques pour l'enseignement.....	47
3.2. Difficultés d'appropriation des modèles scientifiques scolaires de l'énergie.....	59
3.3. Quelles recommandations pour l'enseignement de l'énergie ?.....	63
3.4. Conclusion.....	68
4. Les chaînes énergétiques : une représentation pour les phénomènes énergétiques.....	69
4.1. Définition et généralités.....	69
4.2. Les différentes catégories de chaînes énergétiques.....	71
4.3. Différents types de chaînes – revue bibliographique des propositions didactiques.....	73
4.4. Chaînes énergétiques et difficultés d'apprentissages.....	89
4.5. Caractéristiques de l'énergie représentées par les chaînes énergétiques.....	91
4.6. Conclusion.....	97
Conclusion de la première partie.....	98

DEUXIÈME PARTIE : CADRE THÉORIQUE ET MÉTHODOLOGIQUE

5. Cadre théorique.....	101
5.1. Une triple approche didactique, ergonomique et épistémologique.....	101
5.2. Approche épistémologique.....	103
5.3. Approche didactique.....	107
5.4. Approche ergonomique.....	107
5.5. Relations entre les approches et leurs composantes.....	110
5.6. Conclusion.....	111
6. Questions de recherche.....	113
QR1 – Modèles scientifiques scolaires de l'énergie portés par les institutions.....	113
QR2 – Chaînes énergétiques promues par les institutions.....	114
QR3 – Logiques d'action des formateurs.....	114
7. Méthodologie.....	117

7.1. Constitution du corpus.....	117
7.2. Caractérisation des chaînes énergétiques et de leur utilisation.....	120
7.3. Caractérisation des modèles scientifiques scolaires institutionnels de l'énergie.....	121
7.4. Caractérisation des déterminants des formateurs.....	122
7.5. Analyse des stages de formation F1 et F2.....	123
Conclusion de la deuxième partie.....	125

TROISIÈME PARTIE : MODÈLES SCIENTIFIQUES SCOLAIRES DE L'ÉNERGIE – ANALYSE DE DOCUMENTS INSTITUTIONNELS

8. L'énergie dans le programme de physique-chimie de Cycle 4.....	129
8.1. Place de l'énergie dans le programme.....	129
8.2. Modèle scientifique scolaire de l'énergie proposé par le programme de physique-chimie..	131
8.3. Limites.....	134
8.4. Conclusion.....	134
9. L'énergie dans les documents d'accompagnement Eduscol de Cycle 4.....	137
9.1. L'énergie dans les documents d'aide à la construction de progressions.....	137
9.2. « Quelle bouilloire chois-tu ? Pourquoi ? ».....	143
9.3. « Sur un circuit automobile, quelle voiture pourra atteindre la vitesse de 320 km/h avant la moto ? ».....	144
9.4. « Quel volume de boisson au cola compense les dépenses d'énergie d'un cycliste faisant l'ascension du Mont Ventoux ? ».....	150
9.5. Conclusion.....	151
10. Modèles scolaires de l'énergie dans les manuels scolaires de Cycle 4.....	153
10.1. Manuel Bordas Espace (<i>Brun et al., 2017</i>).....	154
10.2. Manuel Bordas Regaud-Vento (<i>Bélangier et al., 2017</i>).....	164
10.3. Manuel Hachette Éducation (<i>Barde et al., 2017</i>).....	177
10.4. Manuel Hatier (<i>Alibert et al., 2017</i>).....	181
10.5. Manuel Lelivrescolaire.fr (<i>Blanc et al., 2017</i>).....	193
10.6. Manuel Magnard (<i>Begin et al., 2017</i>).....	204
10.7. Manuel Nathan (<i>Amauger et al., 2017</i>).....	215
10.8. Synthèse des modèles proposés dans les manuels.....	222
11. Tâches mettant en jeu une chaîne énergétique dans les manuels scolaires.....	229
11.1. Exercices analysés.....	229
11.2. Analyse des tâches mettant en jeu l'utilisation d'une chaîne énergétique.....	230
11.3. Conclusion de chapitre.....	238
Conclusion de la troisième partie.....	240

QUATRIÈME PARTIE : LA FORMATION CONTINUE À L'ENSEIGNEMENT DE L'ÉNERGIE À DESTINATION DES ENSEIGNANTS DE CYCLE 4

12. L'énergie vue par les formateurs F3A et F3B – analyse de pratiques déclarées.....	245
12.1. Quels formateurs, quelle formation ?.....	245
12.2. Déterminants potentiels de l'activité des formateurs inférés par analyse des entretiens...247	247
12.3. Modèle scientifique scolaire de l'énergie : éléments spécifiques et caractéristiques de l'énergie.....	251
12.4. Conclusion.....	254
13. L'énergie vue par les formateurs F4A, F5A et F6A – analyse de pratiques déclarées.....	257
13.1. Quels formateurs, quelles formations ?.....	257
13.2. Analyse des pratiques déclarées de F4A.....	259

13.3. Analyse des pratiques déclarées de F5A.....	262
13.4. Analyse des pratiques déclarées de F6A.....	266
13.5. Conclusion.....	270
14. L'énergie vue par les formateurs F2A, F2B, F2C et F2D – analyse de pratiques déclarées.....	273
14.1. Quels formateurs, quelle formation ?.....	273
14.2. Déterminants potentiels de l'activité des formateurs inférés par analyse des entretiens....	276
14.3. Modèles scientifiques scolaires de l'énergie présentés par les formateurs.....	283
14.4. Conclusion.....	295
15. Analyse du stage de formation F2.....	297
15.1. Tâches à destination d'enseignants-stagiaires.....	298
15.2. Modèle scientifique scolaire de l'énergie proposé pendant la formation.....	323
15.3. Conclusion.....	332
Analyse croisée des chapitres 14 et 15.....	334
16. L'énergie vue par les formateurs F1A, F1B, F1C – analyse de pratiques déclarées.....	337
16.1. Quels formateurs, quelle formation ?.....	337
16.2. Déterminants potentiels de l'activité des formateurs inférés par analyse des entretiens....	341
16.3. Modèle scientifique scolaire de l'énergie.....	350
16.4. Place et statut de l'électricité.....	358
16.5. Un ensemble de choix menant à un modèle scientifique scolaire de l'énergie <i>parmi d'autres</i>	362
16.6. Conclusion.....	362
17. Analyse du stage de formation F1.....	365
17.1. Présentation générale de la formation.....	365
17.2. Caractérisation du modèle scientifique scolaire proposé.....	368
17.3. Analyse de la séance de formation.....	384
17.4. Conclusion.....	439
Analyse croisée des chapitres 16 et 17.....	440
Comparaison entre les stages F1, F2, F3, F4, F5 et F6.....	443
Conclusion générale.....	445
Rappel des questions de recherche.....	445
Réponses aux questions de recherche.....	445
Discussion.....	447
Ouverture et perspectives.....	449
Bibliographie.....	451

Introduction

Genèse

Dans les anciens programmes de collège français (M.E.N., 2008), l'énergie occupe une place importante au sein du Socle Commun de Connaissances et de Compétences¹ et parmi les thèmes de convergence entre disciplines scientifiques (Physique-Chimie, Technologie, Mathématiques, Sciences de la Vie et Sciences de la Terre). Cependant, l'énergie en tant que concept scientifique unificateur ne figure pas dans la partie disciplinaire « Physique-Chimie » de ces mêmes programmes. Elle y apparaît systématiquement associée à certains domaines scientifiques, en particulier en classe de 3^e : dans la partie qui concerne les piles électrochimiques, on parle d'« énergie chimique », en électrocinétique l'« énergie électrique » est évoquée, et, en mécanique, il est question d'« énergie mécanique », répartie en énergie de position et énergie de mouvement (ou cinétique). Ce type d'organisation des savoirs liés à l'énergie dans les programmes est qualifié de « morcelé » par Bächtold et ses coauteurs (2014, p.78-79).

Lors de la réforme des programmes de 2015, l'énergie est devenue un thème d'enseignement à part entière au collège, et plus précisément au Cycle 4 (M.E.N.E.S.R., 2015). Elle y est présentée comme un concept, et non plus uniquement comme un ensemble de grandeurs associées à des domaines particuliers de la physique ou de la chimie. Nous supposons que cette réorientation « unificatrice » (Bächtold *et al.*, 2014, p.78-79) de l'enseignement de l'énergie est portée par les problématiques sociétales grandissantes liées à l'énergie (épuisement des ressources dites non-renouvelables, pollution liée à des usages excessifs, réchauffement climatique, etc.) Pour que les élèves aient une bonne compréhension de ces enjeux, il leur faut s'approprier le concept scientifique d'énergie, qui s'articule autour de deux piliers : le principe de conservation de l'énergie et le principe de dégradation de l'énergie (§2.1).

Nous avons remarqué que le programme de physique-chimie de 2015 ne fait pas référence au concept de chaîne énergétique². Il s'agit pourtant d'une représentation des phénomènes énergétiques promue en didactique des sciences depuis plusieurs décennies, notamment parce qu'elle permet de présenter l'énergie comme un concept qui unifie les différents domaines scientifiques (Bruguière *et al.*, 2002).

Dans les années 2015-2016, nous avons travaillé à la relecture de certains chapitres d'un manuel scolaire en cours d'écriture au sein d'une grande maison d'édition. Il s'agissait de lire des propositions de chapitres écrits par des enseignants-auteurs, puis de leur proposer des adaptations, des modifications ou des corrections. À cette occasion, nous avons eu un aperçu de la manière dont certains auteurs de manuels scolaires se sont emparés de ce nouveau thème d'enseignement. Nous avons constaté en particulier des divergences de points de vue de la part des différents auteurs sur la

1 Renommé par la suite « socle commun de connaissances, de compétences et de culture », il « définit les compétences, basées sur des connaissances relevant des différents domaines d'enseignement, qu'un élève doit progressivement maîtriser pendant la scolarité obligatoire ». (d'après <https://eduscol.education.fr>)

2 Dans cette introduction, nous choisissons de ne pas définir ce qu'est une chaîne énergétique (notre définition sera donnée au §4.1), en particulier parce que ni la recherche en didactique, ni l'école ne précisent ce qu'est une chaîne énergétique. De plus, au cours de notre travail de recherche, nous avons souvent évoqué les *chaînes énergétiques* au cours d'entretiens avec des enseignants et formateurs, sans les définir et sans que cela ne gêne nos interlocuteurs.

manière dont les élèves doivent comprendre ce concept au collège, et, plus généralement, sur ce qu'est l'énergie en tant que concept scientifique. Par la suite, nous avons eu l'occasion de discuter avec certains auteurs qui ont contribué à l'écriture de manuels scolaires pour deux autres éditeurs : ils nous ont dit avoir rencontré les mêmes difficultés. D'une manière générale, il nous a été rapporté de nombreuses discussions, de nombreux désaccords : Quelles formes d'énergie ? Quelle définition ? Quel sens donner au concept ? Et surtout, quelles représentations et quelles chaînes énergétiques proposer ? Il apparaît qu'aucun consensus n'a pu se dégager, même entre auteurs d'un même manuel.

C'est dans ce contexte qu'est née l'envie de commencer ce travail de recherche : nous avons voulu questionner ces différences d'approches d'un même concept scientifique – *a priori* stabilisé depuis longtemps – par les acteurs de l'enseignement du Cycle 4, en nous intéressant particulièrement aux chaînes énergétiques, représentations des phénomènes énergétiques.

Il nous a alors paru nécessaire de commencer par rencontrer des enseignants de physique-chimie de collège pour avoir un aperçu de la manière dont ils abordent l'énergie avec leurs élèves et pour connaître leur usage des chaînes énergétiques.

Entretiens exploratoires

L'énergie en tant que concept scientifique unificateur étant devenu un nouvel objet d'enseignement au collège, nous nous sommes demandée de quelle manière les enseignants s'étaient appropriés ce thème d'enseignement : Pour eux, qu'est-ce que l'énergie ? Comment présentent-ils ce concept à leurs élèves ? Utilisent-ils des chaînes énergétiques pour représenter des phénomènes énergétiques ? Si oui, lesquelles, pourquoi et pour accomplir ou faire accomplir quels types de tâches ? Si non, pour quelles raisons ?

Pour explorer ces questions, nous avons mené des entretiens auprès de cinq³ enseignants de collège volontaires. Nous voulions ainsi avoir un aperçu de leurs approches, en gardant bien à l'esprit d'une part que notre échantillon, composé de peu d'enseignants, n'est pas représentatif des enseignants de Cycle 4 en France, et d'autre part que les pratiques de classe évoquées par ces enseignants sont des pratiques *déclarées* et non des pratiques réelles.

Profil des enseignants et protocole d'entretien

Les cinq enseignants E1, E2, E3, E4 et E5 avec lesquels nous avons mené nos entretiens ont enseigné respectivement 7, 39, 14, 18 et 8 ans en collège, où ils enseignaient encore lorsque nous les avons rencontrés (début 2020). Par ailleurs, E2 a participé à une journée de formation relative à l'enseignement de l'énergie organisée par l'Union des Professeurs de Physique et Chimie (UdPPC) en mars 2018 ; entre 2015 et 2017, E1 et E5 ont contribué à l'écriture de manuels scolaires, et plus particulièrement aux chapitres relatifs à l'énergie. Nous pouvons donc dire que les enseignants qui ont participé à notre enquête sont expérimentés, et globalement intéressés par l'enseignement de l'énergie.

3 Nous avons prévu d'en effectuer davantage, ce qui n'a pas été possible du fait du premier confinement sanitaire lié à la crise Covid-19, qui a eu lieu lorsque nous étions dans cette partie de notre travail de thèse, puis parce que les enseignants « en attente » n'avaient plus de disponibilités suffisantes dans la suite de l'année scolaire, particulièrement dense pour eux. Cette situation particulière nous a amenée à modifier l'objectif de notre recherche.

Le guide d'entretien complet se trouve en annexe (B), tout comme les transcriptions des entretiens (annexes A), qui sont longs et denses – lorsqu'ils ont été menés, nous ne savions pas encore précisément quelle allait être l'orientation de notre travail de thèse. Nous nous intéressons ici en particulier aux réponses fournies par les enseignants aux questions qui concernent :

- la manière dont ils enseignent le concept d'énergie en classe (à quel(s) niveau(x) scolaire(s)⁴, à quel(s) moment(s) de l'année, avec ou sans définition...);
- la manière dont ils représentent et/ou font représenter les phénomènes énergétiques à leurs élèves et les raisons pour lesquelles ils font cela ;
- leur rapport aux chaînes énergétiques : En représentent-ils ? En font-ils représenter à leurs élèves ? Quelles sont les règles de construction et de lecture de ces chaînes ?

Nous avons ensuite proposé aux enseignants de représenter certaines chaînes énergétiques, puis de les décrire.

Nous leur avons aussi proposé un exercice dont la résolution est facilitée – selon nous – si l'on utilise une chaîne énergétique, dont voici l'énoncé :

« Nous sommes sur le toit d'une maison où se trouvent deux panneaux solaires photovoltaïques identiques, placés dans des conditions d'ensoleillement identiques. Un des deux panneaux sert à chauffer l'eau qui se trouve dans une chaudière (dans la maison), le second panneau ne fonctionne pas (il n'est relié à aucun dispositif électrique). De là où nous sommes (c'est-à-dire : depuis le toit), pouvons-nous savoir rapidement quel panneau est en fonctionnement ? Si oui, comment (et pourquoi) ? »

Si on représente cette situation par des chaînes énergétiques (quelles que soient leurs formes), elles mettent en évidence que le système {panneau débranché} réémet toute l'énergie qu'il reçoit par chaleur et rayonnement, contrairement au système {panneau en fonctionnement}. On peut alors supposer que le panneau débranché sera perçu comme beaucoup plus chaud que l'autre.

Nous présentons ci-après un résumé et une analyse succincte des réponses données par les enseignants à nos questions.

Place de l'énergie dans l'enseignement

E2 enseigne l'énergie uniquement en classe de 3^e ; c'est un thème qu'elle n'enseigne pas en début d'année parce qu'elle le trouve particulièrement compliqué.

À l'inverse, E1, E3, E4 et E5 annoncent enseigner l'énergie toutes les années du Cycle 4, mais avec des approches différentes les unes des autres :

- chaque année, E1 commence l'année scolaire par un enseignement de l'énergie avec représentation de type chaîne énergétique, qu'il réutilise tout au long de l'année dans les différents thèmes du programme ;

- E4 et E5 disent enseigner l'énergie de façon transversale : ils abordent l'énergie dans plusieurs thèmes tout au long du Cycle. Pour E4, ces thèmes sont plus particulièrement l'électricité, les transformations chimiques, la mécanique et les changements d'état. En fin de 3^e, elle fait une sorte

⁴ Le programme à l'origine de nos questionnements est un programme de Cycle : il concerne un enseignement qui se déroule sur trois années scolaires, sans qu'il ne soit précisé à quel moment les notions qui y figurent doivent être abordées.

de récapitulatif général en revenant sur les différentes formes d'énergie. E5 enseigne plus particulièrement l'énergie en classe de 6^e, puis en 3^e à travers deux chapitres qui portent sur l'énergie électrique et sur l'énergie de mouvement ;

- E3 aborde l'énergie sous différents angles selon les années. Il l'évoque en 5^e dans la partie sur l'électricité. En 4^e, il propose à ses élèves une conférence sur la production d'énergie (*via* un atelier pédagogique proposé par EDF) où il est question de ressources renouvelables ou non, de pollution et des déchets radioactifs issus des centrales nucléaires. En 3^e, il formalise tout cela en parlant de chaînes énergétiques, de « pertes de chaleur », d'énergie mécanique (potentielle et cinétique) et de conservation de l'énergie.

Le concept d'énergie – définition, formes d'énergie, propriétés

E3, E4 et E5 ne définissent pas l'énergie en classe, mais décrivent ce concept à leurs élèves par ses effets (E4 : « on reconnaît l'énergie par ses effets (...) et à travers ses formes » (...) « pour m'éclairer j'ai besoin d'énergie lumineuse (...) pour me déplacer j'ai besoin d'énergie » ; E5 : l'énergie « permet » de se chauffer, se déplacer, s'éclairer). E2 définit l'énergie comme une « grandeur physique que l'on calcule à partir de grandeurs physiques que l'on mesure », ce qu'elle illustre par des exemples tout au long de sa séquence d'enseignement (en classe de 3^e). Dès la classe de 4^e, E1 définit l'énergie en l'assimilant au travail (« énergie égale travail »), auquel il ne donne pas le sens que cette grandeur revêt en sciences puisqu'il le décrit comme le fait d'« effectuer une tâche, se chauffer, etc. » E5 définit aussi l'énergie comme « une grandeur qui permettrait de produire un travail » (sans en préciser le sens), mais réserve cette définition à un niveau d'enseignement supérieur à celui du collègue.

Les formes d'énergie que listent les enseignants sont globalement équivalentes (énergies chimique, thermique, cinétique, potentielle [de pesanteur], nucléaire, électrique et lumineuse), bien qu'on puisse noter deux différences majeures. D'une part, pour E1, les énergies électrique et lumineuse sont à distinguer des autres : il les appelle énergies *de flux*, par opposition aux autres formes d'énergie qu'il qualifie de *stockables*. D'autre part, E1, E3 et E4 ajoutent à cette liste l'énergie mécanique, en précisant ou non qu'elle est la somme des énergies cinétique et potentielle de pesanteur. On remarque qu'E5 évoque des formes d'énergie différentes selon les chapitres : quand il parle de mouvement, il parle d'énergies potentielle de pesanteur, cinétique et mécanique, alors qu'en électricité il mentionne les énergies lumineuse, thermique et électrique.

Seul E1 évoque des types de transferts d'énergie, qu'il liste : transferts électrique, mécanique, par rayonnement et thermique.

Aucun des enseignants interrogés n'utilise le concept de « dégradation de l'énergie », pourtant fondamental en physique (voir §2.1), mais auquel ils ne donnent pas de sens scientifique. Au cours des entretiens, il n'a jamais été question d'entropie, de dissipation – ou de dégradation – comme d'une propriété de l'énergie.

Les chaînes énergétiques

Nous ne pouvons pas ici décrire finement et comparer les chaînes énergétiques proposées par les enseignants : ce travail nécessiterait d'avoir théorisé ce que sont les chaînes énergétiques ; nous en parlerons dans le chapitre 4.

Nous remarquons cependant que, lorsque nous avons demandé aux enseignants de représenter la chaîne énergétique associée à une lampe de poche en fonctionnement, nous avons obtenu cinq représentations différentes :

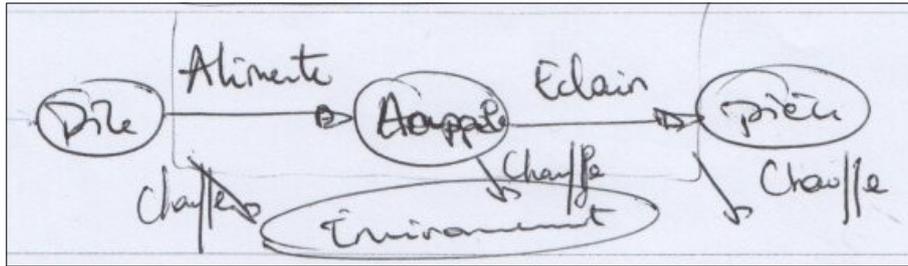


Figure 1 : Chaîne énergétique associée à une lampe de poche en fonctionnement proposée par E1

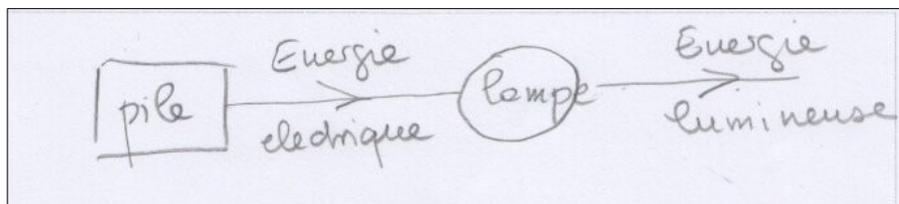


Figure 2 : Chaîne énergétique associée à une lampe de poche en fonctionnement proposée par E2

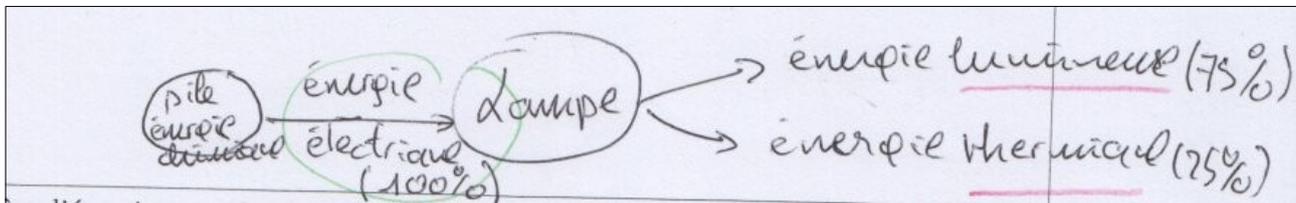


Figure 3 : Chaîne énergétique associée à une lampe de poche en fonctionnement proposée par E3

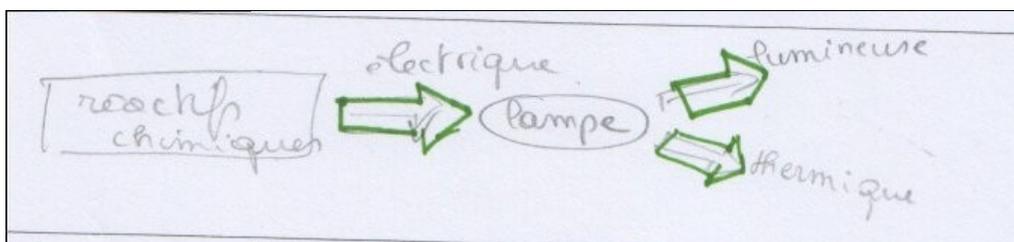


Figure 4 : Chaîne énergétique associée à une lampe de poche en fonctionnement proposée par E4

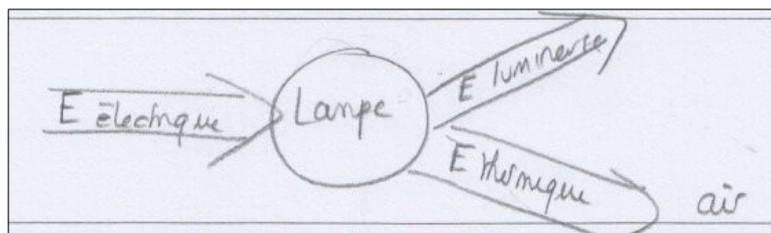


Figure 5 : Chaîne énergétique associée à une lampe de poche en fonctionnement proposée par E5

En dehors de E3, pour qui la chaîne énergétique n'est pas une représentation formelle, mais une « espèce de schéma qui montre que l'énergie rentre et sort à travers un appareil »⁵, les enseignants nous ont dit spontanément comment ils avaient appris à faire des chaînes énergétiques : pour E1, il s'agit de cours de préparation au CAPES ; E2 a suivi une formation spécifique sur l'enseignement de l'énergie en 2018 (via l'UdPPC) ; E4 a étudié toutes les représentations qui figurent dans les manuels et a choisi ce qui lui parlait le plus ; E5 a eu l'occasion de discuter longuement de chaînes énergétiques avec des collègues formateurs et lors de la rédaction du manuel qu'il a contribué à écrire, et questionne encore cette représentation qui ne le satisfait pas totalement (notamment en ce qui concerne les formes d'énergie et la conservation de l'énergie).

E2 et E4 regrettent qu'il n'existe pas de formalisme commun pour ce type de représentations ; E1 pense qu'il en existe un et E3 le suppose, en SVT et technologie (mais n'attache pas d'importance au formalisme de ces représentations). E5 se dit particulièrement conscient qu'il y a des divergences importantes dans ces représentations, en particulier sur ce qui est écrit sur les flèches et dans les figures géométriques.

Structurellement, ces chaînes se ressemblent : elles sont composées de formes géométriques (une à quatre selon les représentations) reliées entre elles par des flèches. Cependant, elles diffèrent par le tracé (les formes géométriques varient et peuvent être toutes similaires ou non au sein d'une même chaîne) et par leur contenu (les expressions qui figurent sur les flèches diffèrent, tout comme la plupart de celles qui figurent dans les figures géométriques).

Notons que E1, E4 et E5 évoquent un autre type de représentations que nous assimilons à des chaînes (§4.1), où figurent des diagrammes en bâtons qui représentent la quantité d'énergie contenue dans un système (ou la quantité d'une forme d'énergie contenue dans un système). E1 les juge complexes et dit ne jamais les utiliser en classe. E4 et E5 évoquent ces diagrammes sur simulation uniquement, disant qu'ils permettent de montrer la conservation de l'énergie mécanique ; E5 ajoute que cette conservation n'a lieu que « dans certaines conditions », qu'il ne précise pas.

Quatre enseignants sur cinq (E1, E2, E3 et E5) affirment qu'une chaîne permet une représentation de la conservation de l'énergie : la somme de ce que représentent les flèches qui entrent dans un système est égale à la somme de ce que représentent les flèches qui en sortent (parfois en attribuant des valeurs d'énergie, de puissance ou des pourcentages à ces flèches)⁶. Pour E3, il faut que des « valeurs numériques ou des pourcentages » figurent sur les flèches pour que ce

5 Il précise qu'il sait que les chaînes énergétiques ne sont pas au programme, qu'il en fait peu et sans formalisme particulier.

soit le cas. Pour E5, les flèches ont une épaisseur telle que la somme des épaisseurs des flèches qui entrent dans un convertisseur est égale à la somme des épaisseurs des flèches qui en sortent (ce qui n'est pas cohérent avec la représentation qu'il propose, voir Figure 5).

Enfin, soulignons qu'aucun des enseignants interrogés ne précise dans quel cadre il est pertinent ou non d'utiliser une représentation de type « chaîne énergétique » ni quelles situations il est possible de représenter ainsi (l'existence d'un domaine de validité particulier associé aux chaînes énergétiques n'est pas abordée).

Utilisation des chaînes énergétiques

Aucun des enseignants interrogés n'a donné d'exemple de situation dans laquelle une chaîne énergétique est utilisée pour résoudre ou aider à résoudre un exercice, quel qu'il soit. E1, E2, E3, et E5 disent qu'ils demandent à leurs élèves de tracer ou de compléter des chaînes, mais pas de les utiliser.

On peut supposer que, pour les enseignants, ces représentations ont surtout un intérêt représentatif et descriptif. Par exemple, pour E1, « le but [de la chaîne énergétique] c'est [montrer] la conservation de l'énergie / t'as un système / qui reçoit / et qui cède » (E1, 186) ; elle sert également à « illustrer les transferts d'énergie » (E1, 188) ou à « expliquer simplement une situation ou un phénomène en termes d'énergie ou de transfert d'énergie » (E1, 190).

Puisque E3 et E5 évoquent l'épaisseur des flèches et la figuration de valeurs numériques sur les flèches, on peut supposer qu'il leur arrive d'utiliser ou de faire utiliser une chaîne énergétique en lien avec ces valeurs, par exemple pour calculer une quantité d'énergie échangée, une puissance ou un pourcentage (*a priori* de puissance ou d'énergie).

En ce qui concerne l'exercice qui a été proposé aux enseignants interrogés, aucun d'entre eux ne l'a résolu. Après réflexion, trois d'entre eux ont dit ne pas savoir répondre. Ils n'ont pas tenté de représenter la situation décrite, ni par des chaînes (dont nous avons pourtant largement parlé tout au long de l'entretien), ni d'une autre façon. E5 pense que les deux panneaux solaires dont il est question ne pourront pas être distingués l'un de l'autre. Seul E1 mène un début de réflexion qui aurait pu lui permettre d'aboutir à une réponse correcte. Nous ne lui avons pas suggéré de tracer de chaînes énergétiques pour l'aider à poursuivre son raisonnement, mais il est possible que cela lui aurait permis de résoudre la tâche.

Les entretiens exploratoires que nous avons menés nous ont montré une multitude d'approches différentes de l'énergie selon les enseignants : ils n'enseignent pas ce concept au même moment de la scolarité de leurs élèves, ne l'abordent pas sous le même angle et ne lui donnent pas la même importance relative dans leurs enseignements. Par ailleurs, bien qu'ils attribuent globalement les mêmes propriétés à l'énergie, ils ne donnent pas tous le même sens à ce concept.

Pendant ces entretiens, nous avons constaté que l'évocation des chaînes énergétiques amène souvent à une forme de crispation chez les enseignants, non objectivable dans les transcriptions. Cette forme de malaise lié aux chaînes énergétiques nous laisse supposer que prévenir un

6 Nous discuterons plus loin (au §3.1, *Formes d'énergie*) de cette affirmation ; il s'agit d'une vision « locale » du principe de conservation de l'énergie.

enseignant que nous souhaitons le voir utiliser des chaînes en classe dans le cadre d'un travail de recherche pourrait l'amener à modifier profondément ses habitudes d'enseignement. Par ailleurs, à cause de la multitude d'approches proposées par les enseignants, il nous a paru difficile (voire très incertain) de sélectionner *a priori* des séances où un enseignant était le plus susceptible d'enseigner l'énergie en y associant une représentation de type « chaîne énergétique » – sans avoir à lui dire qu'il s'agissait pour nous d'un point d'intérêt particulier.

Pour ces raisons, nous avons choisi de ne pas focaliser notre attention sur l'enseignement de l'énergie (et sa représentation par des chaînes énergétiques) dans un contexte de classe ou sur l'appropriation de ce concept par un élève⁷.

Cependant, les difficultés évoquées par les enseignants avec lesquels nous nous sommes entretenue (à travers les entretiens exploratoires que venons de décrire, ou de façon plus informelle) nous ont confortée dans notre volonté de questionner plus en profondeur le concept d'énergie tel qu'il est présenté au Cycle 4 : ses propriétés, sa représentation à travers des chaînes énergétiques et sa finalité.

Alors, plutôt que de focaliser notre attention sur l'enseignement et/ou l'apprentissage de ce concept en axant notre recherche sur la classe, nous avons choisi de nous intéresser à la manière dont d'autres acteurs de l'enseignement, et en particulier les formateurs académiques, perçoivent et transmettent lors de stages de formation le concept d'énergie et comment ils choisissent de le représenter au moyen de chaînes énergétiques – toujours en vue d'un enseignement au Cycle 4.

Structure du manuscrit

La première partie de ce manuscrit inscrit notre travail dans la physique et dans la didactique de la physique (voire, plus largement, dans la didactique des sciences). En effet, pour parler d'énergie, il nous apparaît primordial de commencer par dessiner les contours de ce concept d'un point de vue scientifique. Nous l'aborderons en particulier sous l'angle de la thermodynamique, science des transferts d'énergie. Avant cela, nous préciserons le sens que nous donnerons aux mots « théorie », « concept », « modèle », et aux « modèles scientifiques scolaires de l'énergie », dont l'étude sera au cœur de notre travail de recherche. Nous évoquerons ensuite les difficultés d'enseignement et d'apprentissage liées à l'énergie, ainsi que les propositions faites en didactique pour l'enseignement de l'énergie et pour l'utilisation des chaînes énergétiques.

Dans une deuxième partie, nous exposerons le cadre dans lequel s'inscrit notre recherche, qui repose sur une triple approche épistémologique, didactique et ergonomique. Nous convoquerons le cadre théorique de la modélisation selon la théorie des deux mondes (Tiberghien et Vince, 2005 ; Veillard *et al.*, 2011), qui nous permettra d'analyser les modèles scientifiques scolaires de l'énergie et les tâches que les chaînes énergétiques permettent de résoudre. Nous préciserons nos questions de recherche, qui portent sur la caractérisation des modèles scientifiques scolaires de l'énergie *institutionnels*, que nous mettrons en évidence par l'analyse de documents institutionnels (programmes scolaires, documents d'accompagnement, manuels scolaires), par l'analyse du discours de formateurs académiques qui proposent des séances de formation continue à

⁷ Le fait que notre travail de recherche ait commencé à la fin de l'année 2019 nous a confortée dans ce choix : la situation dans les écoles était telle (crise sanitaire liée au Covid-19) qu'il nous aurait été particulièrement difficile de centrer notre travail sur une enquête en classe.

l'enseignement de l'énergie, et par l'analyse de deux séances de formation continue à l'énergie à destination d'enseignants.

Dans la troisième partie de notre travail, nous présenterons les résultats de notre recherche relatifs à l'analyse des documents institutionnels et, en particulier, à la place, à l'utilisation et au sens donnés aux chaînes énergétiques dans les manuels scolaires de Cycle 4.

La quatrième partie de ce manuscrit s'intéresse à la formation continue à l'énergie en France métropolitaine. Elle est composée de l'analyse des pratiques déclarées de 12 formateurs (qui animent 6 formations distinctes) et de l'analyse de deux séances de formation, qui mettent en évidence et tentent d'expliquer différents choix de modèles scolaires de l'énergie – scientifiques et/ou sociétaux.

Première partie :

contextualisation et ancrage scientifique

« Un poète disait une fois : "Tout l'univers est dans un verre de vin." Vous ne saurez probablement jamais quel sens il attribuait à ces paroles, car les poètes n'écrivent pas pour être compris. Mais il est vrai que si vous regardez un verre de vin de suffisamment près, vous découvrez l'univers entier. (...) Si nos petits esprits, pour certaines commodités, divisent ce verre de vin, cet univers, en parties – la physique, la biologie, la géologie, l'astronomie, la psychologie, etc., – souvenez-vous que la nature ne connaît pas cela ! »

Feynman et al., 2014, p.45 (éd. originale : 1963)

En 1985, Chevallard représente le système didactique par un triangle aux sommets duquel se trouvent l'élève, l'enseignant et le savoir. Notre travail de thèse s'intéresse plus particulièrement au savoir, puisqu'il vise à caractériser l'énergie telle qu'elle est présentée par des acteurs institutionnels, à travers l'analyse de programmes scolaires, de manuels scolaires et du discours de formateurs académiques.

Chevallard (1985) définit l'enquête épistémologique comme l'étude du devenir du savoir dit « savant » dans un contexte de classe, et la transposition didactique comme le passage du savoir savant au savoir enseigné. Nous ne nous placerons pas complètement dans un cadre de transposition didactique, essentiellement pour deux raisons. D'une part, nous ne nous intéresserons pas au savoir enseigné, mais au savoir proposé par l'institution pour l'enseignement. D'autre part, le savoir savant associé au concept d'énergie est particulièrement abstrait, et son utilisation en sciences demande l'élaboration de modèles complexes et divers, dus au fait que l'énergie est une grandeur unificatrice par essence. L'étude de la transposition du savoir conceptuel au savoir à enseigner en passant par ces modèles scientifiques est plus large que notre travail, qui s'inscrit toutefois dans une même dynamique.

Dans cette première partie, nous commençons par définir les termes de concept, modèle, modèle scientifique et modèle scientifique scolaire (chap.1). Nous décrirons ensuite ce qu'est l'énergie en sciences, en abordant différents modèles scientifiques qui lui sont associés (chap.2). Nous donnerons alors les caractéristiques possibles des modèles scientifiques scolaires de l'énergie, en nous appuyant sur les apports et les résultats de la recherche en didactique (chap.3). Enfin, nous nous intéresserons plus particulièrement aux chaînes énergétiques, représentations fréquemment associées aux modèles scientifiques scolaires de l'énergie et largement documentées en didactique (chap.4).

1. D'un concept à un modèle scientifique scolaire

Notre travail porte sur le concept d'énergie, et la manière dont il est interprété, mobilisé et traité par diverses institutions⁸. En sciences, l'appropriation de ce concept se fait par l'élaboration de modèles scientifiques, cohérents avec le concept d'énergie, compatibles entre eux, mais ne se recouvrant que partiellement les uns les autres, et ne partageant pas le même domaine de validité. Pour l'enseignement, son appropriation et sa transmission se font par l'utilisation de modèles scientifiques scolaires.

Si la notion de concept est relativement consensuelle, celle de modèle est complexe et présente un grand nombre d'acceptions différentes, comme le mettent en évidence ou le remarquent de nombreux auteurs parmi lesquels Drouin (1988), Barberousse *et al.* (2000), Soler (2013), Varenne (2013), Frigg et Hartmann (2020), Kermen (2018). Dans ce chapitre, nous allons préciser la notion de concept et expliciter le sens que nous donnons aux modèles dans notre travail, où il sera question en particulier de modèles scientifiques et de modèles scientifiques scolaires, dont nous donnerons les caractéristiques et que nous illustrerons par deux exemples.

1.1. Concept et théorie

Qu'est-ce qu'un concept ?

À l'inverse de beaucoup de termes employés à la fois en sciences et dans le langage courant, le mot concept ne présente pas de polysémie forte, bien que l'on puisse lui attribuer de nombreuses nuances. D'après le dictionnaire (Petit Robert, 2014), il s'agit d'une « idée générale ; représentation abstraite d'un objet ou d'un ensemble d'objets ayant des caractères communs. » En 2000, Barberousse et ses coauteurs proposent une définition⁹ pour « concept, classification » dont nous reproduisons un extrait du premier paragraphe :

« Les concepts sont les éléments dont les pensées – qu'il s'agisse de croyances, de souhaits, d'hypothèses scientifiques ou de spéculations – sont composées. Comme les théories scientifiques sont formulées et communiquées à l'aide de phrases, on identifie généralement les concepts scientifiques à l'aide de certains termes du vocabulaire courant ou d'un vocabulaire spécialisé (...) Par ailleurs on distingue les concepts simples des concepts composés, par exemple le concept de *groupe abélien sans torsion*. On peut aussi distinguer, à la suite de Carnap, concepts classificatoires et concepts quantitatifs. Alors qu'un concept classificatoire permet de classer une chose dans un certain type – par exemple, le concept classificatoire de *mammifère* permet de classer dans le même ensemble toutes les baleines et tous les mathématiciens –, les concepts quantitatifs, comme celui de *température*, permettent de classer les choses selon leur grandeur,

8 Nous regroupons sous le terme « institutions » les acteurs – au sens large – pouvant être considérés comme institutionnels par la communauté enseignante, dans le sens où ils fournissent aux enseignants des directives, ou, du moins, des propositions qui peuvent être perçues comme prescriptives, puisqu'elles sont légitimées par un organe supérieur : les programmes scolaires, légitimés par le Conseil Supérieur des Programmes et le Ministère de l'Éducation Nationale ; les manuels scolaires, légitimés par l'usage, par les éditeurs et les directeurs de collection, qui sont le plus souvent des inspecteurs ou des universitaires ; les documents d'accompagnement du site Internet Eduscol (<https://eduscol.education.fr>), légitimés par le Ministère de l'Éducation Nationale ; les formateurs académiques, légitimés par l'Inspection Académique.

9 Cette définition figure dans un « glossaire critique », en appendice du livre « La philosophie des sciences au XX^e siècle » (Barberousse *et al.*, 2000).

relativement à certaines échelles de mesure. » (Barberousse *et al.*, 2000, p.269-270, italique des auteurs).

Lemeignan et Weil-Barais (1993, p.52-58) distinguent les concepts *catégoriels* des concepts *formels*, en faisant référence à l'ouvrage « Substances et fonctions » (Cassirer, 1910) et aux travaux de Piaget.

Un concept catégoriel renvoie à une catégorie d'objets descriptibles en fonction de leurs attributs et qu'on peut regrouper en sous-catégories, par exemple celle des arbres (peupliers, cerisiers, chênes...) ou celle des carrés (carrés rouges, carrés de 5cm de côté...). Bien que pouvant être abstraits, ces concepts ont en commun de pouvoir être illustrés par des objets ou des images qui en sont un échantillon ou une représentation (pour reprendre nos exemples : un noyer, le dessin d'un sapin ; un carré tracé sur une feuille, un objet donc une face possède les caractéristiques d'un carré).

Les concepts *formels* ne se réfèrent pas à des objets matériels, ne peuvent pas être décrits par des attributs et des fonctions, et il n'est pas possible de trouver d'exemplaires de ces concepts : ils « n'[ont] rien à voir avec de quelconques similitudes génériques existant entre différents exemplaires donnés à la perception » (Cassirer, 1910, cité dans Lemeignan et Weil-Barais, 1993, p.55). Les concepts formels peuvent être de nature *relationnelle* (Lemeignan et Weil-Barais, 1993) : ils se définissent alors les uns par rapport aux autres. Ils peuvent également renvoyer à des entités hypothétiques, catégorie que Lemeignan et Weil-Barais illustrent par le concept d'atome (1993, p.55).

Concept scientifique et théorie scientifique

L'activité scientifique implique l'utilisation et la mise en relation entre des concepts catégoriels (comme ceux dont font partie différents objets utilisés lors d'expérimentations, par exemple) et des concepts formels (comme la plupart des grandeurs physiques et chimiques, le concept de système physique...)

Elle est régie par un ensemble de théories, dont Barberousse et ses collègues (2000) proposent une définition que nous reproduisons en partie :

« La notion de théorie joue indubitablement un rôle prépondérant dans l'activité scientifique, que l'on ne saurait correctement caractériser sans évoquer par exemple la *théorie* newtonienne du mouvement, la *théorie* de l'évolution, ou la *théorie* de la relativité générale. (...) Des théories ayant un même domaine se différencient par les hypothèses ou les principes qui les fondent. (...) On peut enfin caractériser une théorie scientifique par ses buts, qui consistent en la description, l'explication et la prédiction des phénomènes qui tombent dans son domaine.

Si tout le monde s'accorde sur la plupart de ces caractéristiques, la notion n'en fait pas moins l'objet d'un débat au sein des philosophies des sciences, entre ceux qui considèrent que les théories sont des *ensembles d'énoncés*, et ceux qui pensent au contraire que ce sont des *ensembles de modèles*. » (Barberousse *et al.*, 2000, p.296, italique des auteurs).

Dans notre travail, nous allons nous intéresser en particulier à la théorie de l'énergie, qui a comme principale caractéristique d'être unificatrice, c'est-à-dire de relier entre eux tous les domaines scientifiques et, de ce fait, d'avoir un domaine d'application *a priori* illimité. Nous

faisons donc le choix de considérer que les théories scientifiques en général, et la théorie de l'énergie en particulier, sont des ensembles de modèles plutôt qu'un ensemble d'énoncés. Afin de justifier plus finement ce choix, il nous faut à présent définir ce que nous entendons par « modèle ».

1.2. Modèles et modèles scientifiques

Dans le prochain chapitre, nous discuterons du devenir du concept d'énergie dans plusieurs domaines scientifiques, c'est-à-dire des manières dont les sciences se sont emparées de ce concept pour le rendre opérationnel dans leurs différents domaines. Nous ferons alors appel à la notion de modèle et, plus précisément, de modèle scientifique.

Qu'est-ce qu'un modèle ?

Après avoir rappelé la grande polysémie du terme « modèle », Barberousse et ses coauteurs (2000, p.288) soulignent que ce mot prend en particulier deux sens distincts, « qui n'ont que peu de rapports l'un avec l'autre » :

- d'une part, il s'agit d'une représentation provisoire, imparfaite, « élaborée dans un but prospectif ou dans le cadre de la mise à l'épreuve de certaines hypothèses » (Barberousse *et al.*, 2000, p.288), comme le sont certains modèles réduits ou simulations ;

- d'autre part, il s'agit d'un modèle associé à une théorie, composé de « toutes les interprétations qui rendent vraies les formules de la théorie » (Barberousse *et al.*, 2000, p.289).

Cette définition se termine par les mots suivants : « On voit que, même si ces deux sens du mot "modèle" sont très différents, **l'un des principaux problèmes** qui se pose au sujet des modèles dans ces deux sens est **celui de la relation qu'ils entretiennent avec les situations réelles qu'ils représentent**. Cette relation est **à la fois une relation de ressemblance relativement à certaines propriétés pertinentes, mais aussi une relation d'abstraction fondée sur la négation d'autres propriétés**. La difficulté tient à la façon dont on doit évaluer les rôles respectifs de ces deux types de relation. » (Barberousse *et al.*, 2000, p.290 ; notre mise en gras).

Rappelons ici qu'un modèle n'a pas d'existence autonome : il est modèle *de quelque chose d'autre*, il fait référence à *quelque chose d'autre*, qui n'est pas nécessairement le réel (il est possible d'élaborer le modèle d'un modèle, par exemple). Par contre, il *est* autonome, dans le sens où il comporte un ensemble de règles et de caractéristiques garantes de son bon fonctionnement.

Si « dans sa définition la plus large, la notion de modèle recouvre toute représentation d'un système réel, qu'elle soit mentale ou physique, exprimée sous forme verbale, graphique ou mathématique » (Walliser, 1977, p.116), en sciences, un modèle ne peut pas être réduit à sa représentation. À l'instar de Walliser (1977), nous définissons le modèle comme **l'ensemble d'un système représentatif d'un autre système et des éléments de base et règles qui régissent le passage de l'un à l'autre**. Il se doit d'être formalisé ou « axiomatisé », c'est-à-dire déterminé par un ensemble d'éléments de base et de règles d'organisation de ces éléments de base (Walliser, 1977, p.125). Tous les modèles ne sont pas nécessairement complètement formalisés, et les règles d'organisation qui les régissent sont « plus ou moins floues » (Walliser, 1977, p.126) ; cependant, les modèles scientifiques sont le plus souvent très axiomatisés.

Les modèles scientifiques

Pour définir ce qu'est un modèle scientifique, nous adoptons le point de vue de Kermen (2018), pour qui « un modèle scientifique est une construction intellectuelle regroupant un ensemble de concepts souvent interdépendants, qui permet de représenter, expliquer et prévoir, donc de répondre à un grand nombre de questions à propos d'un domaine restreint de la réalité expérimentale et qui est issu d'une ou plusieurs théories » (Kermen, 2018, p.24).

Soler situe le modèle scientifique entre la réalité matérielle, empirique, et la réalité scientifique, portée par une ou plusieurs théories scientifiques actuellement en vigueur, c'est-à-dire « la plus élaborée dont nous disposons » (Soler, 2013, p.195) et, de ce fait, considérée comme vraie. Elle attribue quatre propriétés¹⁰ aux modèles scientifiques (Soler, 2013, p.201) :

- l' « infidélité revendiquée à la réalité modélisée et le décalage spécifiable par rapport à cette réalité (...) scientifique » ;

- l' « efficacité et l'opérativité par rapport à des buts déterminés » ;

- la « localité » (le modèle est utilisé pour résoudre des problèmes *particuliers*) ;

- la « pluralité des modèles » vis-à-vis d'un même objet : un même objet, un même phénomène, un même événement peuvent être interprétés, décrits ou prédits par plusieurs modèles différents, qui ne sont pas nécessairement cohérents ou compatibles entre eux¹¹.

Nous affinons encore notre conception de ce qu'est un modèle, et, en particulier, un modèle scientifique, en soulignant que :

- un modèle peut comporter plusieurs représentations différentes (par exemple, un schéma et une équation peuvent représenter un même modèle, en représentant l'un et l'autre certains aspects d'un même modèle, tout en partageant des éléments communs) ;

- les règles d'organisation constitutives d'un modèle peuvent donner lieu à plusieurs représentations différentes équivalentes, du fait d'une axiomatisation incomplète du modèle ;

- une unique représentation peut être l'illustration de plusieurs modèles distincts, indissociables et indéfinissables tant que les règles d'organisation du modèle n'ont pas été explicitées.

1.3. Modèle scientifique scolaire

Qu'est-ce qu'un modèle scientifique scolaire ?

Un modèle scientifique scolaire est un modèle utilisé dans l'enseignement des sciences, *a priori* en vue de faciliter les apprentissages. Il se distingue du modèle scientifique qui, comme le dit Kermen (2018, p.24), « est avant tout conçu pour être utilisé et non pas pour être enseigné, d'où une adaptation nécessaire pour atteindre les objectifs visés par l'enseignement ». Elle ajoute que « selon le niveau de développement cognitif des élèves et les buts visés par l'introduction du modèle scolaire, celui-ci peut ne comporter que certains éléments ou caractéristiques du modèle scientifique dont il est issu, et ne valoir que pour un champ plus restreint » (Kermen, 2018, p.24-25).

10 Notre objectif étant de préciser ce que nous entendons par « modèle » et non de donner une définition la plus juste possible de toutes les caractéristiques d'un modèle scientifique, nous reprenons ici les grandes lignes des idées développées par Soler, et soulignons, comme elle le fait elle-même tout au long de son article, que les propos que nous citons sont « grossiers, incomplets et critiquables » (Soler, 2013, p.181).

11 En 2013, Morge et Doly illustrent particulièrement cette « pluralité des modèles », dans un article où ils proposent quatre modélisations différentes pour un même objet (une pile), à l'aide de modèles issus de multiples domaines de la physique et des mathématiques.

Les modèles scientifiques scolaires se trouvent à l'interface entre des modèles scientifiques, qui les sous-tendent, et des modèles « primitifs » (Kermen, 2018, p.25), déjà mobilisés par les élèves.

Nous distinguons deux types de modèles scientifiques scolaires : les modèles *initiaux* et les modèles *appliqués*. Les modèles *initiaux* sont des modèles qui ont été explicités, élaborés spécifiquement en vue de faciliter les apprentissages dans un contexte de classe. Les règles qui les régissent sont, le plus souvent, facilement et clairement identifiables. À l'inverse, les modèles *appliqués* ne sont visibles que par l'analyse de pratiques, au sens large (la pratique d'un enseignant, d'un élève, d'un rédacteur de manuels, d'un rédacteur de programmes scolaires...) Prenons l'exemple d'un manuel scolaire dans lequel figurent à la fois une fiche méthodologique décrivant une démarche de modélisation, et des exercices qui font appel à un modèle comparable à celui évoqué dans la fiche méthodologique. Il est possible qu'il y ait un décalage entre le modèle mis en évidence par analyse de la fiche méthodologique, que nous qualifions d'*initial*, et celui mis en œuvre dans les exercices, que nous qualifions d'*appliqué*. Les modèles *appliqués* peuvent être conformes à des modèles scientifiques scolaires *initiaux*. Ils peuvent aussi être le résultat d'une appropriation d'un modèle *initial* – on pourrait parler de *transposition* du modèle initial, en référence à la transposition didactique (Chevallard, 1985). Enfin, ils peuvent avoir été élaborés inconsciemment dans un contexte d'enseignement-apprentissage, par un enseignant, un élève, ou, plus largement, un rédacteur d'exercices, etc.

La modélisation

L'utilisation d'un modèle – et d'un modèle scientifique scolaire – fait appel à une activité bien spécifique : l'activité de modélisation. Elle nécessite la création d'un registre particulier, appelé « élaboration modélisante » par Martinand (1990), qui permet de passer du registre de l'observation au registre du modèle.

Larcher (1994, p.20-23) énonce les caractéristiques importantes de la démarche de modélisation dans un contexte d'apprentissage :

- les tâches proposées doivent inciter à la modélisation : on ne modélise pas « pour modéliser », mais pour répondre à un problème particulier (Genzling et Pierrard – 1994, p.48 – ajoutent que « c'est souvent une demande d'explication ou de prédiction qui se situe au départ d'une activité de modélisation »¹²) ;

- une différenciation explicite des registres est nécessaire, afin que l'apprenant distingue bien ce qui relève du modèle et ce qui relève des observables (au sens large) ;

- le modèle choisi doit être pertinent et ses propriétés doivent être claires ;

- le modèle doit être progressif, et non directement imposé dans sa globalité.

Nous utiliserons la modélisation comme cadre d'analyse pour une partie de notre travail de recherche ; nous en discuterons donc plus largement et plus précisément ultérieurement (chap.5).

Exemples de modèles scientifiques scolaires

De nombreux modèles scientifiques ont été développés et analysés en didactique. Nous n'en citerons que deux, qui nous permettent à la fois d'illustrer notre propos et de montrer la variabilité

12 Bien qu'ils ne le mentionnent pas explicitement, on peut supposer qu'ils parlent des demandes initiant une démarche de modélisation *dans un contexte scolaire*.

des modèles scolaires, qui peuvent être de différente nature, ne pas avoir les mêmes fonctions et répondre à des problèmes divers (Orange, 1994, p.27-29).

Dans un premier temps, nous évoquons les modèles particuliers, formalisés dans les années 80 et largement documentés en didactique (voir par exemple les articles de Genzling, 1988 ; Chomat *et al.*, 1992 ; Orange, 1994 ; Genzling et Pierrard, 1994).

Genzling (1988) définit un modèle particulier comme « un ensemble de propositions à caractère hypothétique permettant d'interpréter (ou expliquer) des phénomènes tels que l'évaporation de l'eau, la dissolution du sucre dans l'eau... Tout modèle particulier comporte une hypothèse d'existence de particules de matière. » (Genzling, 1988, p.53-54) Dans le même numéro d'Aster, Chomat et ses coauteurs définissent les propriétés des particules qui régissent leur modèle particulier (« syntaxe » du modèle) : « les particules sont insécables et gardent les mêmes dimensions et la même masse, elles peuvent être plus ou moins distantes les unes des autres, elles peuvent être plus ou moins agitées de mouvements désordonnés, elle peuvent être plus ou moins libres de se déplacer les unes par rapport aux autres, leur organisation spatiale peut être ordonnée ou désordonnée » (Chomat *et al.*, 1988, p.145-146). Ce modèle permet, par exemple, de décrire et d'expliquer la compressibilité d'un gaz et la non compressibilité d'un solide (Chomat *et al.*, 1988). Il est fondé sur des « images mécaniques », il est « symbolique » et « réductionniste » (Orange, 1994, p.28) : il mobilise une représentation schématique localement superposable à la réalité. Le concept de particule, ici, est catégoriel plus que formel.

Dans un second temps, nous évoquons le modèle utilisé pour enseigner les interactions en physique au lycée, auquel sont associées des représentations de type « diagramme objet-interaction » – ou « diagramme système-interactions » (Tiberghien et Malkoun, 2007 ; Malkoun, Vince et Tiberghien, 2007). Ce modèle, bien que peu documenté en didactique, est largement utilisé dans l'enseignement secondaire en France. De ce fait, s'il est difficile d'en trouver une description formelle, il est aisé de trouver des descriptions méthodologiques permettant aux élèves de tracer des diagrammes objet-interaction : l'objet d'étude est assimilé à un système et est représenté schématiquement par une forme géométrique, tout comme les systèmes qui l'entourent, avec lesquels il est susceptible d'interagir ; les interactions sont représentées entre les systèmes par des doubles flèches (continues en cas de contact entre les objets, ou discontinues dans le cas contraire).

Bien que nous ne l'ayons que très peu décrit, il apparaît évident que ce modèle présente des caractéristiques très différentes d'un modèle particulier. C'est un modèle structurel formel, ni mécaniste, ni symbolique : sa représentation sous forme de diagramme objet-interaction n'est aucunement une image de la réalité. En effet, tous les objets, assimilés à des systèmes, sont représentés par une figure géométrique quelconque ; ces figures sont représentées proches les unes des autres, quelle que soit la distance qui sépare les objets réels ; les flèches n'ont pas de correspondant dans le monde réel (elles représentent des interactions, concept formel).

Fonctions des modèles scientifiques scolaires

Genzling et Pierrard relèvent trois fonctions des modèles dans la modélisation : la fonction de représentation, la fonction d'explication et/ou d'interprétation, et la fonction de prédiction, bien que, selon eux, dans un contexte scolaire, « la modélisation n'a pas toujours pour but d'expliquer ou de

prédire. Dans certains cas, il n'y a ni explication, ni prédiction, mais seulement représentation. » (Genzling et Pierrard, 1994, p.67)

La propriété de représentation fait partie de chaque modèle par nature, puisque, comme nous l'avons dit précédemment, un modèle est un ensemble d'éléments et de règles qui permettent une représentation d'un référent empirique au sens large et, le plus souvent, d'un référent matériel.

La plupart des modèles sont construits par les élèves ou proposés aux élèves pour expliquer la survenue d'un événement, le fonctionnement d'un objet, etc., c'est-à-dire pour répondre à une question de type « pourquoi se passe-t-il ? » Expliquer par la modélisation revient à montrer en quoi l'utilisation du modèle justifie l'observable.

La fonction de prédiction du modèle est inverse : en utilisant le modèle, en restant dans une forme d'activité théorique, un comportement empirique peut être prévu. Il s'agit de répondre à une question de type « que se passera-t-il si ? » La fonction de prédiction teste la pertinence et l'efficacité du modèle.

Les modèles scientifiques scolaires, enrichis au fur et à mesure des apprentissages, peuvent être utilisés avec une visée descriptive, explicative ou prédictive à tous les niveaux scolaires (voir par exemple l'étude de Genzling et Riber – 1991, décrit dans Genzling et Pierrard, 1994 – sur la prédiction de l'ombre d'un piquet en classe de primaire).

1.4. Conclusion

Ce chapitre avait pour objectif d'éclaircir et de préciser certaines notions que nous allons utiliser tout au long de ce manuscrit, dans lequel nous parlerons de l'énergie, vue comme un concept, comme une théorie, comme un objet d'apprentissage – et comme une grandeur physique.

Le concept d'énergie est un concept quantitatif formel, particulièrement abstrait : c'est une abstraction mathématique conservative¹³ qui a une visée unificatrice et universelle par construction. Son utilisation dans les différents domaines scientifiques se fait par l'élaboration et l'utilisation de modèles scientifiques, qui partagent des points communs et qui présentent des différences, notamment en ce qui concerne leurs domaines d'application.

Les modèles scientifiques de l'énergie possèdent :

- les caractéristiques du concept d'énergie ;
- certaines propriétés, certaines règles et certains éléments spécifiques ;
- un domaine de validité clairement défini ;
- certaines représentations, parmi lesquelles on trouve des schémas, des graphiques, des équations, etc.

L'ensemble de ces modèles et du concept d'énergie forment ce que nous appelons la *théorie* de l'énergie.

Dans notre travail de recherche, nous allons caractériser certains modèles scientifiques scolaires de l'énergie *initiaux* et *appliqués* que l'on peut rencontrer dans l'enseignement secondaire de physique-chimie au Cycle 4. Ces modèles, *a priori*, devraient être globalement cohérents avec la

13 Nous y reviendrons au chapitre 2.

théorie de l'énergie – ou, du moins, avec le concept d'énergie. Cependant, leur caractère *scolaire* induit des simplifications qui pourraient les éloigner du concept qu'ils modélisent.

2. L'énergie : un concept et une grandeur scientifiques

Puisque notre travail porte sur la compréhension et l'appropriation du concept d'énergie dans un contexte scolaire¹⁴, nous allons à présent discuter du concept d'énergie et des modèles scientifiques de l'énergie associés à différents domaines scientifiques (en particulier, de la physique).

Le concept d'énergie résulte de la réunion de deux approches des phénomènes physiques très différentes au milieu du XIX^e siècle : une approche par la mécanique, qui décrit et explique le fonctionnement de machines simples et qui met en relation vitesses et masses, et une approche thermique, où il est question de température des corps et de la quantité de chaleur (« calorique ») qu'ils contiennent, cette dernière étant vue comme une substance. Dans ces deux approches, pour des raisons scientifiques et métaphysiques, on recherche l'existence d'une grandeur conservative ; on parle d'*énergie mécanique* et de *quantité de chaleur*, mais ces deux grandeurs ne satisfont pas pleinement au principe de conservation. C'est la rencontre de ces deux approches qui donnera naissance à une unique grandeur conservative : l'énergie, et à un domaine scientifique : la thermodynamique, qui étudie en particulier les transferts d'énergie (Trellu et Toussaint, 1986 ; Guedj et Mayrargue, 2014 ; Bevilacqua, 2014).

L'énergie étant un concept unificateur, il peut en être question dans tous les domaines scientifiques. Selon les domaines, nous verrons que certains aspects de ce concept sont plus ou moins mis en avant. Nous commencerons par décrire le modèle de l'énergie proposé par la thermodynamique, puis nous évoquerons les modèles utilisés dans certains autres domaines scientifiques. Nous ne cherchons pas à proposer une description exhaustive des modèles scientifiques de l'énergie, mais plutôt une esquisse générale de ceux qui sont associés aux domaines scientifiques les plus courants, en mettant en évidence les régularités entre ces modèles et leurs spécificités.

2.1. La thermodynamique, science des transferts d'énergie

La thermodynamique est la branche de la physique qui étudie les systèmes macroscopiques (contenant un très grand nombre de particules) pour lesquels les effets quantiques et relativistes sont négligeables, dans le cadre d'une approche énergétique. Elle s'intéresse en particulier aux transferts d'énergie, en prenant appui sur deux principes fondamentaux : la *conservation* de l'énergie et sa *dégradation*.

Nous rappelons ici les bases de la thermodynamique, en nous appuyant sur quelques ouvrages de référence (Simon, 1979 ; Diu *et al.*, 2007 ; Borel, 1987 ; Prigogine et Kondepudi, 1999 ; Feynman *et al.*, 2014, chap.44 ; Brunet *et al.*, 2019). Il ne s'agit pas ici de décrire précisément et rigoureusement les fondements de la thermodynamique moderne, mais plutôt d'en donner les grandes lignes et de définir certains termes utilisés dans ce domaine scientifique, ce qui nous permettra par la suite de les mettre en regard de ceux qui sont utilisés dans l'enseignement secondaire.

14 Il ne s'agit pas de se focaliser particulièrement sur son émergence et son histoire.

Système thermodynamique

Comme dans tous les domaines scientifiques, en thermodynamique, il est primordial de définir les systèmes d'étude et de les caractériser. On définit classiquement le *système* comme la portion de l'Univers que l'on étudie à laquelle on associe un jeu de grandeurs physiques (Lemeignan et Weil-Barais, 1993, p.56). Un système thermodynamique peut être *ouvert* (susceptible d'échanger de la matière et de l'énergie avec l'extérieur), *fermé* (susceptible d'échanger de l'énergie sans échange possible de matière avec l'extérieur), *isolé* (sans possibilité d'échange d'énergie ni de matière avec l'extérieur), déformable ou rigide.

Chaque système est défini à tout instant par son état thermodynamique, fixé par les valeurs de certaines variables macroscopiques appelées *variables d'état*. On étudie essentiellement des systèmes dans leur état initial et dans leur état final (sans s'attarder sur les états intermédiaires). Un système est en état *stationnaire* lorsque les valeurs de ses variables d'état n'évoluent plus dans le temps. Il est en *équilibre thermodynamique* lorsqu'il n'y a ni mouvement macroscopique, ni flux.

Quand on étudie un système thermodynamique, on simplifie ce qui est extérieur à ce système et agit sur sa physique, qu'on considère comme des *sources de travail* ou des *sources de chaleur* (*thermostats*). Lorsqu'on peut considérer que les variables d'état de la source de travail ou de chaleur n'évoluent pas pendant la transformation, cette source est appelée *réservoir*.

Une *transformation* est l'événement qui a lieu lorsqu'un système passe d'un état à un autre, c'est-à-dire lorsque certaines de ses variables d'état changent de valeur. Une transformation non contrainte est *irréversible* (pour qu'une transformation soit réversible, il faut en permanence contraindre les variables d'état du système). Une transformation est dite *quasi-statique* lorsqu'elle est une succession d'états d'équilibre, c'est-à-dire lorsqu'il y a variation continue de ses variables d'état. Une transformation *réversible* est une transformation quasi-statique dans laquelle le système est en équilibre permanent avec l'extérieur.

Énergie du système

L'ensemble de l'énergie d'un système, notée E , est composée de son énergie cinétique macroscopique (liée à sa vitesse), de l'énergie due à l'interaction de ce système avec des champs extérieurs, et de son énergie interne, notée U .

Les énergies cinétique macroscopique (liée à la vitesse du système) et potentielles (liées aux éventuelles interactions du système avec l'extérieur) sont rarement prises en considération car « la plupart du temps, en thermodynamique, le système considéré est défini de telle manière et ses transformations [sont] telles que seule l'énergie interne varie. » (Simon, 1979, p.157)

L'énergie interne du système est due aux particules qui le composent. Cela correspond à l'énergie liée au mouvement des particules (translation, rotation, vibration) et aux interactions entre ces particules, qui sont négligeables dans les systèmes gazeux mais prises en considération dans le cas de liquides et de solides. La plupart du temps, on néglige les composantes liées au nuage électronique (haute température) et au champ magnétique (Brunet *et al.*, 2019, p.14). Elle est aussi composée « de l'énergie potentielle de forces macroscopiques intérieures ; par exemple, l'énergie interne d'un ensemble de galaxies est constituée en grande partie de l'énergie potentielle d'interaction gravitationnelle » (Pérez et Pérez, 1994, p.1603), bien que cette composante de

l'énergie interne soit le plus souvent nulle dans les systèmes étudiés en thermodynamique élémentaire.

Dans ces conditions, l'énergie interne est généralement¹⁵ une grandeur extensive additive.

Transferts¹⁶ d'énergie

Lorsqu'un système thermodynamique reçoit de l'énergie de l'extérieur ou cède de l'énergie à l'extérieur, il effectue un *transfert d'énergie*. La valeur de ce transfert peut être positive ou négative, selon que le système reçoit ou cède de l'énergie.

Il existe différents types de transferts, que la thermodynamique classe en deux catégories : le travail et la chaleur.

Travail

Le travail est un transfert d'énergie qui met en jeu une force qui s'exerce sur un système et dont le point d'application se déplace au cours du temps. Le travail d'une force se calcule comme l'intégrale le long du trajet suivi du produit scalaire de la force par le déplacement infinitésimal $d\mathbf{r}$.

En thermodynamique, les principaux travaux considérés sont le travail des forces de pression, le travail élastique, le travail électrique et le travail chimique. L'encadré ci-dessous (Figure 6) illustre cela en détaillant succinctement le calcul d'un travail de force de pression.

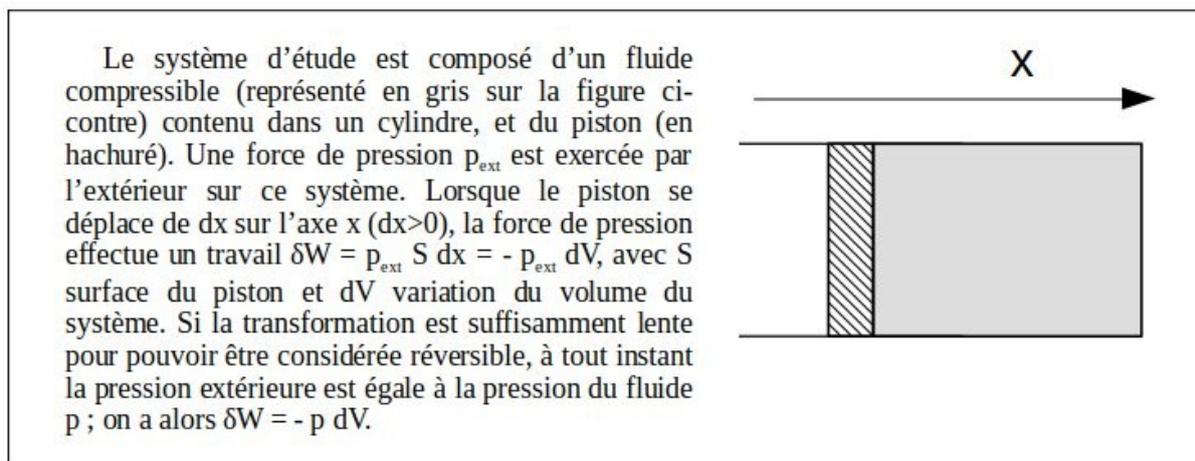


Figure 6: travail des forces de pression (à partir de Brunet et al., 2019)

15 Comme le font remarquer Brunet *et al.* (2019, p.16), elle n'est plus additive pour des potentiels qui n'ont pas l'allure d'un potentiel de Lennard-Jones, par exemple lorsqu'on s'intéresse à un système dont la charge électrique n'est pas nulle ou lorsqu'on considère les interactions entre deux étoiles.

16 Nous faisons le choix d'utiliser le terme « transfert » plutôt que celui d'« échange », que certains auteurs privilégient (Brunet *et al.*, 2019). Selon nous, le mot « échange » laisse supposer l'existence de deux flux de sens contraires, à l'inverse de « transfert ».

Chaleur

Par définition, un transfert d'énergie qui n'est pas un travail est appelé *chaleur*¹⁷. Lorsque le transfert d'énergie par chaleur se fait par contact direct avec le système, on parle de *conduction* ; lorsqu'il s'effectue par transport de matière, on parle de *convection*.

La convection est un phénomène complexe à modéliser mathématiquement (Brunet *et al.*, 2019), contrairement à la conduction, dont la densité de flux se calcule en utilisant la loi de Fourier.

Le système est composé de la poignée métallique d'une poêle. On pose cette poêle sur une plaque de cuisson. Le système reçoit de l'énergie par conduction : la chaleur se diffuse depuis la poêle jusqu'à sa poignée (sans transport de matière).

Texte 1: exemple de situation modélisable par un transfert d'énergie par conduction

Lorsqu'on chauffe une pièce avec un radiateur de type « convecteur », l'élément chauffant de ce dernier, situé en bas de l'appareil, chauffe l'air qui se trouve à son contact. L'air chaud monte et ressort par le haut de l'appareil : l'air ambiant se réchauffe petit à petit. Les courants ainsi créés sont appelés *courants de convection*.

Texte 2: exemple de situation modélisable par un transfert d'énergie par convection

Transfert radiatif

Certains auteurs (par exemple : Borel, 1987 ; Prigogine et Kondepudi, 1999) présentent le transfert d'énergie par rayonnement comme un travail, au même titre que les travaux électrique ou mécanique : les forces associées au flux radiatif travaillent lors de l'interaction entre rayonnement et matière (ici : le système thermodynamique étudié). Dans un article récent (2022), après avoir souligné que le rayonnement n'est pas un transfert d'énergie mais de l'énergie (puisque il a une existence dans le vide), Pujol explicite précisément en quoi, selon lui, « l'échange d'énergie par rayonnement est (...) *fondamentalement un travail* » (p. 605 ; italique de l'auteur) en détaillant les forces qui travaillent lors de ce type de transfert.

Le transfert radiatif peut aussi être présenté comme une forme de chaleur (Brunet *et al.*, 2019 ; Diu *et al.*, 2007, p.487). Dans cette approche, on part du fait que tout corps de température de surface T émet un rayonnement dont le flux est quantifiable. De façon approximative, on assimile ce corps à un corps noir (qui absorbe tout le rayonnement qu'il reçoit, quelles que soient ses longueurs d'onde), et on calcule la puissance du rayonnement électromagnétique qu'un élément de surface dS de ce corps émet selon la formule : $dP = \sigma T^4 dS$, avec σ constante de Stefan-Boltzmann ($5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4}$) et T température du corps. Cette *puissance* de rayonnement n'est pas mise en relation avec un *travail*.

Le premier principe – conservation de l'énergie

Comme le dit Simon (1979, p.155), « le premier principe [de la thermodynamique] n'est rien d'autre que le *principe de conservation de l'énergie* appliqué aux transformations d'un système

17 Dans un souci de précision de vocabulaire, notons que, dans l'enseignement secondaire et supérieur francophone, le terme « chaleur » tend actuellement à être remplacé par l'expression « transfert thermique » ; voir Pujol, 2018. Par ailleurs, à la marge, on constate que certains auteurs préfèrent parler de « flux de chaleur » pour désigner ce type de transferts, et considèrent la chaleur comme une forme d'énergie (Prigogine et Kondepudi, 1999).

macroscopique » (italique de l'auteur). L'énergie ne peut être ni créée, ni détruite ; de ce fait, l'énergie d'un système qui n'échange pas de matière avec l'extérieur ne s'accroît que si on lui en fournit et ne diminue que s'il en cède à l'extérieur.

Lors d'une transformation, la variation d'énergie d'un système fermé est donc égale à la somme des transferts d'énergie qu'il a subis (travail, noté W , et chaleur, notée Q , comptés positivement lorsque le système a reçu de l'énergie et négativement lorsqu'il a cédé de l'énergie) : $\Delta E = W + Q$

Ce principe est communément appelé *principe de conservation de l'énergie*, mais peut également être appelé *principe de conservativité* de l'énergie, ce qui met l'accent sur le fait que l'énergie est une grandeur *conservative* (Pujol, 2009 ; Ducasse et Pujol, 2019), qui ne peut être ni créée ni détruite. Pour des raisons pratiques et d'usage, nous utiliserons dans la suite de ce travail uniquement le terme de *conservation* de l'énergie.

N'oublions pas que ce principe concerne la grandeur énergie, et aucunement les formes d'énergie dont nous discuterons ensuite (§2.2) : ces dernières peuvent se conserver dans certaines circonstances, mais ne se conservent pas dans l'absolu (elles ne sont pas conservatives).

Comme dit précédemment, en thermodynamique, on s'intéresse le plus souvent à des systèmes dont seule l'énergie interne varie. Dans ce cas, $\Delta E = \Delta U = W + Q$. C'est par cette dernière écriture que le premier principe est souvent modélisé mathématiquement dans ce domaine scientifique.

Le second principe – dégradation de l'énergie

Bien que l'énergie se conserve en toute circonstance, toutes les transformations ne sont pas envisageables pour autant. Le second principe de la thermodynamique permet de déterminer quelles sont les transformations possibles et celles qui ne le sont pas. Il a donné lieu à de nombreuses formulations au cours du temps.

Au début du XIX^e siècle, Carnot analyse des machines à vapeur et affirme que « pour qu'un système suivant un cycle thermodynamique produise du travail, il doit échanger de la chaleur avec au moins deux sources de chaleur de températures différentes » (Carnot, 1824, dans Brunet *et al.*, 2019). Il constate que l'énergie apportée à un système par chaleur ne peut pas être intégralement transformée en travail par ce système et quantifie cette limite de production de travail en déterminant qu'elle n'est due qu'aux températures des systèmes en jeu.

Plusieurs dizaines d'années plus tard, Clausius propose une autre formulation de ce principe : « La chaleur ne peut passer spontanément d'un corps froid vers un corps chaud. » (dans Prigogine et Kondepudi, 1999, p.67) ; c'est lui qui invente et formalise le concept d'entropie.

De nos jours, le second principe de la thermodynamique est le plus souvent énoncé en introduisant la fonction d'état *entropie*, notée S , dont la valeur augmente lors de toute transformation réelle¹⁸ d'un système. Citons par exemple l'énoncé de ce second principe selon Brunet *et al.* (2019) :

« Pour tout système, il existe une fonction d'état appelée entropie, notée S , telle que pour un système isolé, libéré d'une contrainte qui le maintenait dans un état initial, le

18 Elle pourrait rester constante lors de transformations parfaitement réversibles, « jamais parfaitement réalisées » (Simon, 1979, p.191)

système évolue dans le sens de l'augmentation de l'entropie. À l'équilibre thermodynamique, l'entropie est maximale. » (p.26, vidéo 3)

Le second principe de la thermodynamique – et, à travers lui, le concept et la grandeur *entropie* – traduisent l'irréversibilité des transformations réelles et la *dégradation*¹⁹ de l'énergie : l'énergie transférée par travail est toujours dégradée (en partie), ce qui se traduit par l'augmentation de l'énergie thermique des systèmes. Selon les types de transformations, ceci se manifeste par divers effets, comme les frottements en mécanique ou l'effet Joule en électrocinétique.

2.2. L'énergie dans les autres domaines scientifiques

Après avoir évoqué la manière dont l'énergie est prise en considération en thermodynamique, nous allons discuter de ce concept tel qu'il apparaît dans d'autres domaines scientifiques, comme la mécanique classique, l'électromagnétisme, et, dans une moindre mesure, la chimie et la biologie.

Nous rappelons qu'il ne s'agit pas ici de décrire précisément la manière dont l'énergie y est abordée, décrite et considérée, mais plutôt d'en esquisser les grandes lignes, en soulignant les différences et les points communs avec l'approche thermodynamique. Certains thèmes, jugés complexes et trop éloignés de l'objet d'étude de notre travail (l'enseignement de l'énergie au Cycle 4), ne sont pas abordés – en particulier l'atomistique et la physique quantique.

L'énergie en mécanique classique

Dans le livre « L'Univers mécanique », Valentin (1999) consacre un chapitre à la conservation de l'énergie. Il le commence en considérant un système qui ne subit aucun frottements et en annonçant que ce qui se conserve dans ce type de système est appelé « énergie mécanique ». Cette énergie *mécanique* est elle-même composée de deux types d'énergie : l'énergie que l'on qualifie de *cinétique*, « mot qui exprime le mouvement » (p.125), et celle qui est dite *potentielle*, « mot inventé pour exprimer la potentialité d'un mouvement ultérieur » (p.125), associée à des champs de forces *conservatives*, c'est-à-dire permettent la conservation de l'énergie mécanique, et dont on remarque que le travail ne dépend pas du chemin suivi (p.133). Au cours d'un mouvement, il y a *conversion* de l'énergie potentielle en énergie cinétique, et inversement, de telle sorte que la somme des deux soit toujours constante.

La conservation de l'énergie mécanique est affinée par la suite, lorsque Valentin précise qu'en toute rigueur, le système pour lequel l'énergie mécanique se conserve est constitué à la fois de l'objet d'étude et de l'objet à l'origine du champ :

« En fait l'énergie mécanique d'un objet dans un champ de forces centrales n'est strictement conservée que si la source du champ a une masse infinie ou, en termes physiques, suffisamment grande par rapport à celle de l'objet pour qu'on puisse considérer cette source comme immobile et dans le même état d'énergie pendant tout le temps de son interaction avec l'objet. (...) Cependant, en toute rigueur, c'est l'énergie mécanique du système constitué par la Terre et le caillou qu'il faut considérer comme conservée. En ce sens, l'énergie mécanique d'un système n'est conservée que s'il est

19 Nous préférons utiliser le terme de *dégradation*, qui traduit justement le fait que les types de transferts ne sont pas *équivalents*, à celui de *dissipation*, qui va à l'encontre de l'idée de conservation (voir par exemple Lahousse, 1906).

isolé, c'est-à-dire si l'on peut négliger l'action de forces externes. » (Valentin, 1999, p.149)

Nous constatons que le sens donné au concept de « système isolé » diffère selon le domaine considéré (mécanique et thermodynamique), et ce même lorsque les scientifiques de ces différents domaines de la physique font référence au même sujet : l'énergie.

Feynman et ses coauteurs (2014) proposent une autre approche : ils commencent le premier tome de leurs livres de mécanique par la conservation de l'énergie (au chapitre 4, après trois chapitres introductifs et généraux), *avant* d'aborder les forces. L'énergie est présentée comme une grandeur abstraite qui se conserve lors de toute transformation (p.47-48). Les auteurs décrivent et quantifient l'énergie potentielle (de pesanteur) en considérant des systèmes dont seule l'altitude varie et en prenant appui sur le principe de conservation de l'énergie, puis l'énergie cinétique est introduite par l'étude d'un système dont seules la vitesse et l'altitude varient au cours du temps (pendule) : son existence et sa formule sont déduites du principe de conservation de l'énergie. Lorsque le système a une vitesse maximale, son énergie cinétique est maximale et son énergie potentielle est minimale (son altitude est minimale) ; lorsque le système a une vitesse nulle, toute son énergie est sous forme potentielle : au cours du temps, il y a *conversion* de l'énergie cinétique du système en énergie potentielle (lorsque le pendule descend) puis de l'énergie potentielle en énergie cinétique (lorsque le pendule monte), et ainsi de suite.

Dans ces deux ouvrages de mécanique, les auteurs expliquent que lorsque la somme de toutes les formes d'énergie connues ne satisfait pas au principe de conservation, cela signifie qu'il existe au moins une forme d'énergie encore inconnue, qu'il faut « inventer ». Après avoir discuté des énergies cinétique et potentielles, en suivant cette démarche, Valentin (1999) énumère des formes d'énergie associées à des forces non conservatives, qui justifient l'arrêt d'un « système réel masse-ressort » : « Néanmoins, on peut sauvegarder la conservation de l'énergie en inventant, pour les besoins de la cause, de nouvelles formes d'énergie qui se manifestent de diverses façons, chacune avec un nom approprié : l'énergie d'agitation thermique, pour l'élévation de température du système, l'énergie acoustique, pour ses grincements éventuels, l'énergie de structure, pour les modifications de structure des matériaux au fil des oscillations, etc. » (p.127).

Feynman et ses coauteurs (2014, p.56) proposent une liste réduite et exhaustive de formes d'énergie, qui sont au nombre de six : il s'agit de l'énergie cinétique, de l'énergie gravitationnelle, de l'énergie élastique (associée à l'élongation d'un ressort), de l'énergie électrique (« en relation avec l'attraction et la répulsion entre charges électriques » – p.56 – elle englobe rayonnement et lumière), de l'énergie nucléaire (« en relation avec l'arrangement des particules à l'intérieur du noyau », p.56), et de l'énergie de masse (« un objet a de l'énergie du fait de sa simple *existence* », p.56). Les autres types d'énergie évoqués sont composés des formes mentionnées précédemment : l'énergie thermique est définie comme « l'énergie cinétique d'un mouvement interne » (p.56) ; l'énergie chimique, « libérée dans des réactions chimiques » (p.56), est décomposée en énergies « cinétique des électrons à l'intérieur des atomes [et] électrique d'interaction des électrons et des protons » (p.56).

Notons que Feynman *et al.* (2014) et Valentin (1999) considèrent dans un premier temps des systèmes qui ne subissent aucune forme de frottements. Ces derniers sont introduits après l'étude de

l'énergie cinétique et des énergies potentielles gravitationnelle et élastique, comme de nouvelles formes d'énergie qui expliquent l'absence de mouvement perpétuel des objets réels.

En plus du chapitre déjà évoqué, relatif au concept d'énergie et à sa conservation, le premier livre de mécanique de Feynman et ses coauteurs (2014) comporte un chapitre consacré à l'énergie potentielle, où les auteurs proposent de trouver des formules d'énergies potentielles de telle sorte que le principe de conservation de l'énergie soit satisfait – *potentiel* étant « le nom général de l'énergie qui est liée à la position d'un objet relativement à quelque chose d'autre » (p.52). Cette recherche s'effectue en prenant appui sur les lois de Newton.

Il apparaît que l'énergie, en mécanique, est souvent vue comme issue de la dynamique, ce que confirme Valentin (1999), pour qui « les notions d'énergie cinétique et d'énergie potentielle proviennent de l'intégration, au sens mathématique, de la relation $\mathbf{F} = m\mathbf{a}$ qui traduit le principe fondamental de la dynamique. » (p.126). L'accent est mis sur la formalisation et la quantification des transferts d'énergie – presque exclusivement des travaux – pour répondre à des problèmes de physique, en particulier pour déterminer des positions ou des vitesses. Notons que le *travail* n'est pas présenté de la même manière selon les auteurs. Valentin (1999) en donne une description similaire à celle de la thermodynamique : dans son ouvrage, il est vu « comme un opérateur de transfert d'énergie » (p.135), tandis que Feynman *et al.* (2014) ne mentionnent pas cela dans les parties de leur livre qui concernent le travail – en particulier, on remarque que le mot « énergie » n'apparaît pas dans le §14.1 *Travail*, où il est exclusivement présenté de façon mathématique comme « l'intégrale curviligne du produit scalaire $\mathbf{F}\cdot d\mathbf{s}$ » (p.204). Si l'énergie mécanique d'un système n'est pas conservée, la quantité d'énergie « perdue » par ce système correspond à une libération d'énergie par travail de forces non conservatives – et à une augmentation de l'énergie thermique. Cependant la dégradation de l'énergie n'est pas nommée (ni sa dissipation) et n'apparaît pas dans les lexiques des ouvrages de mécanique auxquels nous nous sommes référée (Valentin, 1999 ; Feynman *et al.*, 2014), et la chaleur n'y est pas mentionnée.

Énergie, électricité et électromagnétisme

Pour dessiner les contours du modèle scientifique de l'énergie en électromagnétisme, nous avons consulté plusieurs ouvrages de référence du supérieur (Pérez *et al.*, 2019 ; Feynman *et al.*, 2019a, 2019b ; Aksas, 2018, 2020 ; Akbi, 2019, 2021). Dans ces livres, l'énergie n'est presque jamais évoquée en tant que concept scientifique unificateur ; les énergies magnétique, électrocinétique et électrique sont évoquées.

L'approche privilégiée se fait en référence à la mécanique : on associe une énergie aux forces qui travaillent. Les premiers mots du chapitre « Énergie potentielle. Potentiel électrostatique » du livre d'électromagnétisme de Pérez et ses coauteurs (2019) illustrent cela (il s'agit de la première mention d'« énergie » dans ce livre) :

« Nous avons vu que le champ électrostatique \mathbf{E} , introduit à partir de la force de Coulomb, satisfait à une première propriété fondamentale, connue sous le nom de théorème de Gauss, attribuée à la forme en $1/r^2$ de cette force. Nous nous proposons d'établir une seconde propriété du champ \mathbf{E} , en relation avec son aspect énergétique, et dégager ainsi le concept de potentiel.

Il apparaît alors naturel de se référer au théorème de l'énergie en mécanique et avant tout d'exprimer le travail de la force de Coulomb. Notons que cette démarche est analogue à celle adoptée pour la force de gravitation qui, comme la force électrostatique, varie en $1/r^2$. » (Pérez *et al.*, 2019, p.29)

Au cours de notre travail de recherche, nous nous sommes entretenue avec plusieurs chercheurs en physique (en particulier en physique des particules et en physique des plasmas) à qui nous avons demandé de nous parler d'énergie²⁰. Dans un premier temps, chacun d'entre eux a évoqué l'énergie à travers un modèle de mécanique, puis, certains d'entre eux ont discuté de l'énergie sous l'angle de la thermodynamique. Nous leur avons alors demandé de nous parler de l'énergie dans un contexte électromagnétique large (depuis les circuits électriques les plus simples à la prise en considération des champs électromagnétiques les plus complexes). Les chercheurs avec lesquels nous nous sommes entretenue ont commencé par évoquer la relation mathématique entre tension et intensité, puis entre puissance et énergie, et ont fini par cesser de parler du concept d'énergie en tant que tel pour ne l'envisager que sous un angle mathématique, en évoquant le vecteur de Poynting et en énonçant, pour deux d'entre eux, les équations de Maxwell.

D'après les propos tenus par ces chercheurs et nos lectures, il apparaît que le modèle scientifique de l'énergie en électromagnétisme est essentiellement mathématique, et que le concept scientifique unificateur d'énergie n'est, le plus souvent et dans une certaine mesure, pas au cœur de ce domaine scientifique.

L'énergie "en dehors de la physique"

Après nous être intéressée aux modèles de l'énergie dans différents domaines de la physique, nous avons consulté quelques ouvrages de chimie (Atkins *et al.*, 2104 ; Chang et Overby, 2019), de biologie (Raven *et al.*, 2020 ; Reece *et al.*, 2012) et de géologie (Renard *et al.*, 2018 ; Landry *et al.*, 2014) afin de voir comment ces domaines scientifiques se sont appropriés ce concept.

Atkins et ses coauteurs (2014) introduisent leur ouvrage de chimie générale par des *Fondements*, dont la première partie s'intitule « Matière et énergie ». Ils y posent la question de la définition de l'énergie, qu'ils considèrent comme une grandeur *de la physique*, dont ils utilisent une définition « pratique » pour la chimie :

« Mais qu'est-ce que l'énergie ?

Le mot *énergie* est si courant dans le langage quotidien que la plupart des gens ont une idée de ce qu'il signifie ; toutefois, pour avoir une réponse technique à cette question, nous devrions plonger dans la théorie de la relativité qui est largement au-delà du champ de cet ouvrage. En chimie, nous utilisons une définition pratique de l'**énergie** comme étant l'aptitude à fournir un travail, le **travail** étant défini comme un mouvement contre une force opposée. » (Atkins *et al.*, 2014, p.F11 ; italique et mise en gras des auteurs)

L'énergie totale d'un système est présentée comme la somme de ses énergies potentielle, cinétique et électromagnétique. Les auteurs donnent des exemples qualitatifs et quantitatifs de chacune de ces formes d'énergie. Les formes d'énergie *thermique* et *chimique* sont ensuite définies

20 Deux de ces entretiens ont été enregistrés, mais ils n'ont pas été transcrits dans le cadre de notre travail de thèse. Nous les avons réalisés dans le but d'étayer et d'obtenir une description plus fine du modèle électromagnétique de l'énergie, or, les propos tenus pendant ces entretiens ne nous ont pas permis d'affiner ce modèle, c'est pourquoi nous avons choisi de ne pas les transcrire.

comme composées d'énergie cinétique, potentielle et électromagnétique (p.F12-F15). Dans la suite de leur ouvrage, le concept d'énergie est fréquemment mobilisé, d'abord brièvement en atomistique (chapitres 1 et 2), puis plus largement en thermodynamique (chapitres 8 et 9). Atkins *et al.* (2014) semblent présenter la thermodynamique comme un domaine de la chimie faisant référence au concept d'énergie qui, lui, est défini par la physique.

Dans leur ouvrage de chimie générale, Chang et Overby (2019) ne présentent pas l'énergie comme une grandeur en tant que telle, mais parlent de plusieurs formes d'énergie qu'ils définissent au cas par cas, comme l'énergie cinétique (en lien avec la théorie cinétique des gaz, p.157-160), l'énergie associée aux orbitales moléculaires (p.379) ou l'énergie de liaison (p.331).

Le livre de biologie écrit par Raven et ses coauteurs (2020) définit l'énergie comme « la capacité à effectuer un travail » (p. 113) – à l'instar de Atkins *et al.* (2014) en chimie. Différentes formes d'énergie sont définies succinctement dans le glossaire de l'ouvrage (p.G-9) ou mentionnées dans l'index (p.I-9) : l'énergie cinétique, l'énergie d'activation, l'énergie libre, l'énergie potentielle et l'énergie de la nourriture. Le chapitre « énergie et métabolisme » de biologie cellulaire s'appuie sur les deux principes de la thermodynamique et est introduit par ces mots :

« La thermodynamique est la branche de la physique qui traite des échanges entre les diverses formes d'énergie. Les cellules sont gouvernées par les lois de la physique et de la chimie, et la compréhension de celles-ci constitue donc un prérequis pour la compréhension du fonctionnement des cellules » (Raven *et al.*, 2020, p.113).

De la même manière, Reece et ses coauteurs (2012) consacrent la première partie du chapitre « Introduction au métabolisme » de leur ouvrage de biologie à l'énergie (« Le métabolisme d'un organisme transforme la matière et l'énergie selon les principes de la thermodynamique », p.160-163), qui est présentée comme « la capacité de causer un changement » (p.160). Les auteurs soulignent que « la vie dépend de la capacité des cellules à transformer [l'énergie] d'un type en un autre » (Reece *et al.*, 2012, p.160), avant d'aborder les deux principes de la thermodynamique.

Les ouvrages de géologie que nous avons consultés ne font mention d'énergie que de façon marginale. En effet, le mot « énergie » ne figure ni dans le lexique, ni les titres de chapitres ou de paragraphes de l'ensemble de l'ouvrage « Éléments de géologie » de Renard et ses coauteurs (2018), tandis que Landry *et al.* (2012) évoquent uniquement les « sources d'énergie » dont la Terre a besoin pour fonctionner : « une source externe, essentiellement le Soleil, et une source interne, principalement d'origine radioactive » (Landry *et al.*, 2012, p.54).

Suite à la lecture sommaire de ces quelques ouvrages, nous constatons qu'en chimie et en biologie, l'énergie est généralement perçue comme un concept *de la physique*. Cependant, l'approche privilégiée pour parler d'énergie dans ces domaines scientifiques est une approche par la thermodynamique, similaire à celle que nous avons décrite précédemment (§2.1). Les échanges énergétiques qui ont lieu au cours de transformations chimiques (en lien ou non avec le vivant) sont décrits et étudiés en thermodynamique chimique. Il s'agit d'un sous-domaine de la thermodynamique, qui prend appui de façon rigoureuse sur les principes de la thermodynamique. Cependant, les hypothèses habituelles de la thermodynamique générale ne sont pas identiques à celles prises en compte en chimie et en biologie, où on s'intéresse plus fréquemment à des systèmes ouverts et/ou dont la composition chimique varie au cours du temps. Par ailleurs, des grandeurs

liées aux transformations chimiques sont définies, comme l'enthalpie de réaction, l'entropie de réaction, ou encore les quotients de réaction et constante d'équilibre associés à une équation de réaction, qui permettent de déterminer la possibilité et la spontanéité d'une transformation chimique. La notion d'énergie est aussi associée à la détermination du caractère exothermique ou endothermique d'une transformation chimique.

2.3. Quels choix pour parler de l'énergie, vue comme un concept unificateur ?

Nous avons discuté du concept scientifique d'énergie tel qu'il est considéré dans différents domaines scientifiques : nous avons remarqué que, selon les domaines, les aspects de ce concept qui sont le plus mis en avant et pris en considération diffèrent. En particulier, en thermodynamique, on met l'accent sur les transferts d'énergie (travail et chaleur) et sur l'énergie interne du système, tandis qu'en mécanique, les formes d'énergie cinétique et potentielle sont essentielles, et une autre forme d'énergie est attribuée à l'ensemble qu'elles forment : l'énergie mécanique ; l'énergie interne n'est pas mentionnée.

Malgré ces différences, l'énergie, notion à laquelle tous les domaines scientifiques font référence à différentes échelles, est un seul et même concept que l'on peut qualifier d'universel. Nous allons à présent revenir sur certaines caractéristiques de l'énergie : les formes d'énergie et le sens qui peut être donné à cette grandeur, vue sous un angle unificateur, et valable quel que soit le domaine considéré.

Formes d'énergie

D'un point de vue scientifique, nous avons vu qu'il n'existe pas de classification unique et universelle pour les différentes formes d'énergie.

En thermodynamique, on s'intéresse principalement à l'énergie interne du système qu'on étudie, réduite à l'énergie cinétique des particules qui le composent et à leur énergie d'interaction les unes avec les autres. Le plus souvent, il n'est pas fait mention d'autres formes d'énergie. Dans le domaine de la mécanique, on a tendance à distinguer l'énergie mécanique (composée de l'énergie cinétique *macroscopique*, c'est-à-dire liée au mouvement global du système, et d'énergies potentielles, c'est-à-dire liées à des forces conservatives), qui se conserve dans le cas d'un système mécanique "idéal", et les autres énergies, liées aux frottements, souvent présentées comme les causes de la non-conservation de l'énergie mécanique d'un système "réel".

Les formes d'énergie peuvent être réparties en deux catégories : les énergies cinétiques, liées au mouvement, et les énergies potentielles, liées à la potentialité d'un mouvement futur. On distingue deux sortes d'énergies cinétiques : celle qui est associée au mouvement global du système considéré, souvent appelée énergie cinétique macroscopique (bien que ce terme puisse paraître incongru lorsque le système étudié est microscopique), et celle qui est associée aux mouvements des particules qui composent le système, souvent appelée énergie thermique. Contrairement à ce que cet adjectif suggère, cette forme d'énergie n'est pas uniquement liée à la température du système puisqu'elle est modifiée lors d'un changement d'état (physique) du système. Les autres formes d'énergie sont regroupées ensemble sous le qualificatif de *potentielles*.

Cette catégorisation des énergies « cinétique vs potentielle » apparaît consensuelle en sciences ; nous l'utiliserons donc dans la suite de notre travail.

Les autres dénominations données aux formes d'énergie sont liées à la manière dont se manifeste l'évolution de la quantité d'énergie associée à chacune de ces formes : par exemple, si la composition chimique d'un système est modifiée lors d'une transformation, on dit qu'il a perdu de l'énergie *chimique* ; si l'élongation d'un élastique est modifiée lors d'une transformation, on dit qu'il a perdu ou gagné de l'énergie *élastique*, etc. En physique, les formes d'énergie sont choisies de telle sorte qu'on puisse les associer à la variation d'une ou plusieurs variables d'état du système et, à terme, leur attribuer une formule mathématique. De ce fait, par exemple, l'énergie « musculaire » ou l'énergie « alimentaire » n'existent pas, dans le sens où la physique ne les considère pas comme des *formes* d'énergie. Pour autant, on peut quantifier les échanges énergétiques effectués par un muscle ou par un aliment, mais en attribuant des variables physiques à ces systèmes qui permettent de les envisager sous un angle énergétique scientifique. Nous choisissons donc d'adopter le point de vue présenté dans Feynman *et al.* (2014) et Valentin (1999) : une forme d'énergie, c'est un type d'énergie qui a été inventé pour satisfaire au principe de conservation de l'énergie. Peu importe le nom que l'on donne aux différentes formes d'énergie : il suffit qu'elles soient clairement définies et que leurs descriptions physiques et mathématiques soient en accord avec le principe de conservation de l'énergie.

Concept d'énergie et quantification de l'énergie

En thermodynamique et en mécanique, nous avons présenté l'énergie comme une grandeur physique qui décrit l'état d'un système à un instant donné. Lorsque le système change d'état, c'est-à-dire lorsqu'au moins une des grandeurs qui le caractérise est modifiée, la valeur de l'énergie de ce système est susceptible de changer.

Nous avons décrit l'énergie comme une grandeur absolue, de ce fait on peut imaginer pouvoir attribuer une unique valeur d'énergie à chaque système, à chaque instant.

Il est important de préciser que cette vision, bien qu'intéressante pour résoudre des problèmes de physique, reste réductrice. Jusqu'ici, nous avons vu qu'il est possible d'associer à la plupart des formes d'énergie une formule qui permet de leur attribuer une valeur. Par exemple, l'énergie cinétique d'un système se calcule en multipliant le carré de sa vitesse par la moitié de sa masse. En disant cela, nous avons omis de préciser que la vitesse du système est relative et dépend du référentiel dans lequel nous nous plaçons pour l'étudier : on ne peut pas quantifier l'énergie cinétique d'un système *dans l'absolu*. On peut toutefois donner la valeur de l'énergie cinétique d'un système de masse m à vitesse v_1 par comparaison à celle d'un système de même masse m à vitesse v_2 , ou plutôt quantifier la *différence* d'énergie cinétique entre ces deux systèmes. Pour d'autres raisons et bien qu'on puisse imaginer pouvoir la calculer, on ne s'intéresse pas non plus à l'énergie chimique *totale* contenue dans un système à un instant donné. On peut toutefois comparer l'énergie chimique contenue dans un système dont on connaît la composition avant et après transformation chimique, c'est-à-dire quantifier la *différence* d'énergie chimique entre ces deux systèmes.

Par ailleurs, lorsqu'on étudie un système avec des lunettes énergétiques, de façon implicite, on ne s'intéresse généralement pas à sa quantité d'énergie « totale », « absolue », mais uniquement à quelques unes des formes d'énergie qu'il contient (lorsqu'on s'intéresse à une pile électrochimique,

il est rare de prendre en considération son énergie potentielle de pesanteur et son énergie cinétique ; en mécanique, l'énergie liée à la composition des objets étudiés est rarement prise en compte, etc.) et aux différences de valeurs que prennent ces formes d'énergie entre le début et la fin d'un événement.

En ce sens, l'énergie est un outil mathématique qui permet de répondre à des questions dans de nombreux domaines scientifiques, sans qu'une parfaite maîtrise du concept scientifique d'énergie soit nécessaire pour celui qui l'utilise : l'utilisation d'un modèle scientifique de l'énergie ne nécessite pas une connaissance totale de la théorie de l'énergie, ni même du concept d'énergie, qui reste, avant tout, une abstraction mathématique.

2.4. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons tenté de mettre en évidence et d'esquisser les contours de la théorie scientifique de l'énergie. Nous avons présenté différents modèles scientifiques de l'énergie – en particulier, ceux associés à la thermodynamique et à la mécanique. Nous avons montré que la notion d'énergie est complexe ; nous avons tenté de la décrire au mieux, malgré son abstraction et la difficulté qu'ont les scientifiques à la définir.

Quel que soit le domaine considéré, l'énergie est *ce qui se conserve*, indépendamment du temps, du type de transformation et de l'endroit où elle a lieu. D'une façon plus générale, les deux principes fondamentaux de la thermodynamique, qui permettent une description mathématique et physique de ce concept, restent valables dans tous les domaines scientifiques : d'une part, l'énergie ne peut être ni détruite, ni créée, d'autre part, elle se dégrade lors de toute transformation réelle. Puisque ces principes sont vérifiés dans tous les domaines de la physique, nous considérons qu'ils sont attribuables au concept d'énergie.

Nous constatons toutefois que ces propriétés fondamentales, bien que présentes dans les modèles de l'énergie que nous avons décrits, ne sont pas nécessairement au cœur des axiomes descriptifs de ces modèles. En particulier, la dégradation de l'énergie est vue comme une mise en échec de la conservation de l'énergie mécanique en mécanique (dans une optique d'ingénierie, elle est perçue comme non souhaitable et à limiter), et n'est pas une caractéristique apparente de l'énergie dans les autres domaines que nous avons pris en considération²¹.

Pour pouvoir *parler* d'un concept aussi complexe que l'énergie dans un contexte qui n'est pas purement scientifique, il doit être adapté au public à qui on souhaite le présenter – dans le cas qui nous intéresse, aux élèves de collège. Cette adaptation doit à la fois respecter au mieux l'intégrité scientifique du concept et être accessible aux personnes à qui elle est destinée. Pour décrire l'adaptation d'un concept scientifique à un public non scientifique, nous faisons appel à la notion de *modèle scientifique scolaire* de l'énergie, que nous allons décrire dans le prochain chapitre.

21 Nous n'avons pas mentionné spécifiquement le domaine de l'électrocinétique, où l'effet Joule, qui traduit la dégradation de l'énergie dans un système électrique, revêt pourtant une grande importance.

3. Vers un modèle scientifique scolaire initial de l'énergie

Définitions, propriétés, difficultés de compréhension et pistes pour l'enseignement en didactique

Si l'énergie est un concept scientifique abstrait et difficile à définir, dans un contexte scolaire, c'est aussi un concept polysémique, qui revêt à la fois le sens qui lui est donné en sciences, le sens que la société lui donne dans la vie quotidienne (§3.1), et les sens parfois contradictoires qui peuvent lui être donnés dans différentes disciplines scolaires (Lancor, 2014 ; Bruguière *et al.*, 2002). Tout ceci en fait un concept particulièrement complexe à enseigner. À partir des années 1970, un certain intérêt pour l'enseignement de l'énergie a vu le jour : suite au premier choc pétrolier (1973), les recherches en didactique se sont multipliées pour que le thème de l'énergie, omniprésent au quotidien, soit correctement compris par les élèves d'un point de vue scientifique (Koliopoulos et Tiberghien, 1986 ; Bécu-Robinault et Tiberghien, 1998). Nous allons passer en revue les connaissances et résultats issus de la recherche en didactique concernant la compréhension du concept d'énergie et son enseignement (§3.2 et §3.3) : comment peut-il être défini en classe ? Quelles propriétés lui sont attribuées ? Quelles conceptions erronées lui sont fréquemment associées ? Quelles pistes pour son enseignement ont été proposées par la recherche en didactique ?

En répondant à ces questions, nous dessinerons les contours d'un modèle scientifique scolaire de l'énergie initial pour l'enseignement secondaire.

3.1. L'énergie : définitions et caractéristiques pour l'enseignement

Avant d'entendre parler d'énergie dans un contexte scolaire, les élèves y sont confrontés dans leur vie de tous les jours. Nous avons donc choisi de commencer cette section en décrivant ce que signifie le mot « énergie » au quotidien, dans la société. Nous discutons ensuite du sens donné à ce concept en physique²², dans un contexte scolaire et en didactique. Nous nous intéressons en particulier aux différentes propriétés et caractéristiques associées au concept scolaire d'énergie, que nous définirons et décrirons en nous appuyant sur des travaux didactiques. Les définitions de ces propriétés n'étant pas toujours stabilisées, nous explicitons nos choix de vocabulaire de façon à constituer une liste de propriétés et de caractéristiques qui peuvent être associées au concept scolaire d'énergie, à laquelle nous nous référerons dans la suite de notre travail.

22 Bien que la notion d'énergie soit mobilisée dans plusieurs disciplines scolaires où elle ne prend pas exactement le même sens (Lancor, 2014 ; Bruguière *et al.*, 2002), nous avons choisi de centrer notre travail sur le sens qui lui est donné en physique – voire en chimie, puisque ces deux disciplines sont enseignées par le même enseignant dans le système scolaire secondaire français.

L'énergie au quotidien

Dans la société, l'énergie est un terme polysémique, utilisé pour faire référence à des notions très différentes les unes des autres. Il renvoie essentiellement à deux domaines : un domaine métaphysique et philosophique, et un domaine économique et sociétal ; il peut également être abordé en tant que concept scientifique.

Les dictionnaires que nous avons consultés (TLFi, Petit Robert 2020, Grand Robert 2022, Larousse 2007) font état de ces trois grandes catégories de définitions.

Dans un sens courant, l'énergie est assimilée à une forme de *vigueur* (parfois morale) et au mot *force*, présenté comme un synonyme du mot *énergie* par l'ensemble des lexicographes (TLFi, Petit Robert 2020, Grand Robert 2022, Larousse 2007).

En ce qui concerne les définitions présentées comme scientifiques, elles ne mettent pas l'accent sur le caractère unificateur de ce concept scientifique et elles assimilent majoritairement l'énergie au travail, sans prendre en considération la chaleur (TLFi, Petit Robert 2020, Grand Robert 2022). Le Larousse (2007) propose une définition plus générale, mais incomplète (l'énergie y est vue comme la « grandeur mesurant la capacité d'un système à modifier l'état d'autres systèmes avec lesquels il entre en interaction » et est considérée comme conservative uniquement en « physique classique et en chimie », mais pas en « physique des hautes énergies », ni en « thermodynamique »). Bien que mettant en jeu des concepts scientifiques, ces visions de l'énergie ne sont pas conformes au concept scientifique d'énergie tel que nous l'avons décrit précédemment (chap.2) et ne mettent pas en avant ses principales caractéristiques (conservation, dégradation, unification).

Les lexicographes du TLFi et du Larousse (2007) n'évoquent pas l'énergie d'un point de vue économique et sociétal, à l'inverse de ceux du Petit Robert (2020) et du Grand Robert (2022), qui présentent alors l'énergie comme assimilée à certaines sources d'énergie (pétrole, charbon, etc.) et mentionnent, entre autres, les énergies « carbonée » (Grand Robert, 2022), « verte » (Petit Robert, 2020 ; Grand Robert, 2022), « douce » (Petit Robert, 2020 ; Grand Robert, 2022), les « économies d'énergie » (Petit Robert, 2020), la « production, consommation d'énergie » (Petit Robert, 2020).

L'énergie est un concept très présent en politique et dans les médias, où il revêt un sens bien particulier : dans ce contexte, c'est un objet de consommation qu'il faut préserver dans une optique écologique et de développement durable. Au niveau gouvernemental, ce sujet de société est pris en charge en particulier par les ministères de la *Transition énergétique* et de la *Transition écologique et de la Cohésion des territoires*. En général, l'énergie y est associée à ou confondue avec des sources d'énergie, c'est-à-dire à des choses matérielles (gaz, pétrole, marée, uranium...) qui permettent de faire fonctionner des objets techniques (par exemple : centrales électriques et voitures) ; l'énergie est aussi très souvent confondue avec l'électricité. Sur le site Internet www.ecologie.gouv.fr, on trouve des expressions comme « consommation énergétique », « économie d'énergie », « chèque énergie », « sobriété énergétique », qui présentent l'énergie comme un objet de consommation qui a un coût. À l'inverse du concept scientifique d'énergie, cette énergie-là ne se conserve pas et n'a pas de dimension universelle. Elle n'est présente que dans certains objets matériels ou dans certaines situations spécifiques, en particulier lorsqu'il y a de l'électricité ou un combustible qui brûle dans l'intérêt du consommateur (c'est-à-dire : lorsqu'il y a un transfert d'énergie « utile » pour l'utilisateur).

Dans la suite de notre travail, pour faire référence à cette conception particulière de l'énergie, nous utiliserons l'expression de « concept sociétal d'énergie », par opposition au concept scientifique d'énergie – et au concept scientifique scolaire d'énergie, que nous allons évoquer par la suite.

Définitions de l'énergie pour l'enseignement et en didactique de la physique

Nous nous interrogeons à présent sur la transposition du concept scientifique de l'énergie dans un contexte scolaire d'enseignement et d'apprentissage en sciences physiques, discipline scolaire qui « introduit et formalise le concept énergie », présenté comme « fondamental pour la discipline » (Darot, 1986, p.108) (voir aussi Koliopoulos et Tiberghien, 1986).

Une définition de l'énergie apparaît comme consensuelle à l'heure actuelle dans l'enseignement en sciences physiques (de Hosson, 2016) : l'énergie, c'est la *grandeur qui caractérise la capacité d'un système à effectuer un changement* sur l'extérieur (c'est-à-dire à modifier l'état d'un système autre que lui-même) et sur lui-même (c'est-à-dire à modifier son état). Lorsque l'état d'un système est modifié, c'est-à-dire lorsqu'une ou plusieurs variables d'état de ce système change (température, altitude, vitesse, etc.), son énergie est modifiée : elle change de valeur et/ou de forme.

Cependant, dans notre revue de littérature scientifique et didactique, nous avons remarqué une définition particulière, qui revient régulièrement depuis les années 1970 (Lehrman, 1973, dans Trellu et Toussaint, 1986) à nos jours, selon laquelle l'énergie serait la *capacité d'un système à effectuer un travail*. Cette définition figure dans certains travaux de recherche en didactique contemporains (Warren, 1986 ; Tatar et Oktay, 2007 ; Hobson, 2004 ; McIldowie, 2004) et a été donnée par plusieurs des enseignants que nous avons interrogés lors de nos entretiens exploratoires (voir notre Introduction)²³. C'est aussi la définition scientifique la plus souvent attribuée à l'énergie dans les dictionnaires usuels (voir ci-dessus, *L'énergie au quotidien*). Comme dit précédemment, cette définition est incomplète : elle ne traduit ni l'universalité du concept d'énergie, ni la conservation de la grandeur énergie.

En faisant souvent référence à Feynman (1980), certains chercheurs en didactique de la physique préfèrent ne pas définir directement l'énergie mais la présenter comme une grandeur à laquelle on attribue des caractéristiques²⁴, dont en premier lieu le principe de conservation (voir par exemple Duit, 1984 ; Bental *et al.*, 1995 ; Bécu-Robinault, 1997 ; Gaidioz *et al.*, 1998 ; Taber, 1989 ; Lancor, 2014 ; Trumper *et al.*, 2000).

Certains auteurs adoptent des points de vue proches de celui des thermodynamiciens en mentionnant des points essentiels qui recouvrent ceux que nous avons vus au §2.1 : par exemple, pour Duit (1984, p.59), l'énergie est un concept abstrait, elle peut se transférer, se convertir, c'est-à-dire prendre plusieurs formes différentes, elle se conserve et se dégrade ; selon Trumper et ses collègues (2000), c'est une grandeur abstraite, qui se conserve, se stocke, se dégrade et existe sous différentes formes. D'autres chercheurs (par exemple Bental *et al.*, 1995 ; Bécu-Robinault, 1997 ;

23 Par ailleurs, dans leur analyse de programmes et manuels parue en 2014, Bätchold et ses collègues remarquent une grande variété de définitions pour l'énergie de l'école au lycée, dont celle-ci dans un manuel de collège (3^e).

24 On peut aussi considérer que présenter l'énergie comme un concept abstrait auquel on attribue des propriétés est une forme de définition de l'énergie.

Gaidioz *et al.*, 1998) proposent une liste réduite de propriétés, en se focalisant sur la conservation, le transfert et le stockage.

Nous allons expliciter et discuter des propriétés qui sont le plus souvent attribuées à l'énergie (de façon plus ou moins explicite : par exemple, le fait que l'énergie soit une grandeur physique est rarement mentionné mais est toujours pris en considération) en nous appuyant majoritairement sur des écrits produits en didactique de la physique.

L'énergie : une grandeur abstraite

L'énergie est un concept quantitatif : c'est une grandeur physique, qui peut être calculée (mais qui ne peut pas être mesurée directement). On lui attribue alors une valeur numérique à laquelle on associe une unité de mesure : le joule (J), unité dérivée du Système International et égale au newton mètre (Nm), est utilisée de façon privilégiée en physique. On constate cependant que cette unité n'est que très rarement mentionnée dans un contexte non exclusivement scientifique, où on rencontre beaucoup d'autres unités pour l'énergie. Citons par exemple le kilowattheure (kWh), utilisé dans la vie quotidienne (notamment dans les factures d'électricité), la Tonne Équivalent Pétrole (TEP), utilisée dans l'industrie, et la grande calorie (Cal²⁵), utilisée en diététique et dans l'alimentaire.

Il existe une autre grandeur physique intrinsèquement liée à l'énergie : la puissance (unité dérivée du Système International : le watt, W). C'est la grandeur qui relie l'énergie transférée au cours d'un phénomène à la durée de ce phénomène : elle correspond à la quantité d'énergie qui est transférée par un système ou à un système par unité de temps. On peut la voir comme un *débit* d'énergie. C'est une grandeur qui est liée à des flux et à des différences d'énergie et non à des valeurs « absolues » d'énergie.

Enfin, rappelons que l'énergie est un concept particulièrement abstrait ; il ne s'agit pas d'un concept *catégoriel* mais d'un concept *formel*. Cette catégorie de concepts, à laquelle on ne peut pas associer de « prototype » sous la forme d'une image mentale, est complexe à assimiler (Lemeignan et Weil-Barais, 1993, p.52-58).

Conservation de l'énergie

D'un point de vue thermodynamique, nous avons vu (§2.1) que la propriété de conservation de l'énergie est intimement liée à la temporalité des événements : la quantité d'énergie présente *avant* une transformation et celle qui est présente *après* cette transformation sont égales, l'énergie ne pouvant être ni créée, ni détruite.

En didactique, la conservation est le plus souvent présentée comme la propriété fondamentale de l'énergie mais elle n'est en général ni définie, ni discutée (voir par exemple Duit, 1984 ; Bental *et al.*, 1995 ; Bécu-Robinault, 1997 ; Gaidioz *et al.*, 1998 ; Taber, 1989 ; Lancor, 2014 ; Trumper *et al.*, 2000).

Cette propriété est parfois envisagée sous un autre angle (déjà évoqué en Introduction dans les *Entretiens exploratoires*) : elle est alors associée au fait qu'à un instant donné, le flux d'énergie qui

25 La grande calorie est souvent confondue avec la calorie (cal), qui est égale à 1/1000 Cal ; la grande calorie est parfois notée kcal (pour *kilocalorie*).

entre dans un système est égal au flux d'énergie qui sort de ce système (ce qui implique que le système considéré ne subisse pas de variations d'énergie en interne). Pour des raisons de clarté, dans la suite de ce travail, nous appellerons cette propriété-là « conservation locale » de l'énergie : elle est une conséquence de la conservation de l'énergie appliquée localement et instantanément à certaines situations.

Dégradation de l'énergie

La dégradation de l'énergie est le second pilier de la thermodynamique : ce principe traduit l'irréversibilité des transformations réelles (§2.1). Certains didacticiens s'y sont intéressés, d'abord, en la considérant comme une propriété de l'énergie parmi les autres (Koliopoulos et Tiberghien, 1986 ; Trellu et Toussaint, 1986) et, plus récemment, en mettant en avant la mauvaise compréhension qu'en ont certains élèves et enseignants (Pintó *et al.*, 2005 ; Doménech *et al.*, 2007) (voir plus loin, §3.2).

D'un point de vue scientifique, cette propriété est pourtant essentielle ; elle est aussi particulièrement intéressante pour l'enseignement dans le secondaire, parce qu'elle est liée à la compréhension des enjeux sociétaux relatifs à l'énergie (Lancor, 2014 ; Doménech *et al.*, 2007) ; comme le dit Duit (1986, p.89, dans Domenech et al, 2007) :

« No other aspect in physics instruction is treated in such disproportion to its significance. Without the aspect of energy degradation, understanding of the physical energy concept is incomplete ; without it the energy concept must fail in applications to nature, technology and everyday life. »²⁶ (Duit, 1986, p.89, dans Domenech et al, 2007)

Pour illustrer cela, prenons l'exemple d'un élève ayant parfaitement assimilé la conservation de l'énergie, mais n'ayant jamais entendu parler de sa dégradation : il ne peut *a priori* pas comprendre pour quelles raisons (autres qu'économiques) on lui demande de *faire attention à sa consommation électrique* ou de *ne pas gaspiller les ressources*. En effet, d'après ses connaissances scientifiques scolaires, l'énergie se conserve, elle peut changer de forme ou de lieu de stockage (voir ci-dessous), mais elle ne se consomme pas et ne peut pas disparaître. Dans cette optique, il semble parfaitement inutile – voire absurde – de chercher à *l'économiser*.

Transfert d'énergie

L'idée de transfert d'énergie apparaît comme consensuelle en didactique bien que, tout comme la conservation de l'énergie, elle ne soit que rarement définie. Au cours de nos recherches, nous avons relevé en particulier trois articles ou groupes d'articles dans lesquels les transferts d'énergie sont explicités : celui de Trellu et Toussaint (1986), ceux de Lemeignan et Weil-Barais (1992, 1993), et ceux de Bental *et al.* (1995), Gaidioz *et al.*, (1998), Bécu-Robinault (1997), Devi *et al.* (1996), El Hajjami *et al.* (1999), Megalakaki et Tiberghien (2011). Dans tous ces articles, le concept de transfert est décrit de façon cohérente et en accord avec la thermodynamique (§2.1) : pour définir un transfert d'énergie, on considère deux systèmes distincts ; si un de ces systèmes cède de l'énergie à l'autre système, on dit qu'il effectue un transfert d'énergie vers ce système.

26 « *Aucun autre aspect de l'enseignement de la physique n'est traité de manière aussi disproportionnée par rapport à son importance. Sans prendre en considération la dégradation de l'énergie, la compréhension du concept scientifique d'énergie est incomplète ; sans elle, l'énergétique ne peut pas décrire correctement les phénomènes naturels, technologiques et liés à la vie quotidienne.* » (Notre traduction)

Avant de détailler les différents types de transferts mentionnés et décrits par ces auteurs, expliquons brièvement les raisons pour lesquelles nous nous sommes particulièrement intéressée à leurs articles.

- En 1986, Trellu et Toussaint publient une synthèse des travaux effectués par deux groupes de réflexion au sujet de l'enseignement de l'énergie, lors de rencontres proposées par l'équipe de didactique des sciences de l'INRP (Trellu et Toussaint, 1986, p.43). Dans cet article, ils partent d'une approche historique et scientifique de l'énergie puis abordent des questions centrales relatives au concept scolaire d'énergie. C'est dans ce contexte qu'ils attribuent des définitions aux différents types de transferts d'énergie.
- En 1992, Lemeignan et Weil-Barais s'intéressent à l'apprentissage de la modélisation dans l'enseignement de l'énergie. Ils proposent une méthode d'apprentissage du concept d'énergie, dans laquelle la notion de transfert est fondamentale, et décrivent largement leur modèle, l'utilisation qui peut en être faite et qui en est faite dans un contexte de classe. Dès les années 1990, la méthode qu'ils proposent est présentée comme un exemple d'apprentissage par la modélisation dans des travaux de didactique (en particulier, Martinand *et al.*, 1994 ; voir aussi, par exemple : Koliopoulos et Ravanis, 1998, 2000 ; Bruguère *et al.*, 2002 ; Ballini *et al.*, 1997, 1998).
- À la fin des années 1990, l'équipe de recherche COAST (Gaidioz *et al.*, 1998) a développé un modèle scientifique scolaire de l'énergie en vue d'un enseignement en classe de 1^{re} S, ce qui a donné lieu à un grand nombre de publications (par exemple : Bental *et al.*, 1995 ; Bécu-Robinault, 1997 ; Devi *et al.*, 1996 ; El Hajjami *et al.*, 1999 ; Megalakaki et Tiberghien, 2011). Tous ces auteurs s'appuient sur le même modèle scientifique scolaire de l'énergie et leurs articles le décrivent de façon identique ; lorsque nous y ferons référence, nous mentionnerons uniquement Bental *et al.* (1995) – il s'agit de la référence la plus ancienne – ou Gaidioz *et al.* (1998) – il s'agit de la référence la plus complète.

Alors qu'en thermodynamique, on considère deux catégories de transferts (travail et chaleur, voir §2.1), pour l'enseignement, la didactique en propose le plus souvent quatre qui, pour Trellu et Toussaint (1986, p.69), sont « liés à quatre types d'interaction entre deux systèmes » : le *transfert mécanique* (aussi appelé *mouvement* ou *travail mécanique*), le *transfert électrique* (aussi appelé *électricité* ou *travail électrique*), le *transfert par rayonnement* (aussi appelé *rayonnement*, *lumière* ou *transfert radiatif*) et le *transfert thermique* (ou *chaleur*). Notons que dans un premier temps d'autres dénominations peuvent être proposées, par exemple en utilisant les verbes « chauffe », « éclaire » et « met en mouvement » (Lemeignan et Weil-Barais, 1992). Les travaux mécanique et électrique peuvent être regroupés dans une seule catégorie (Lemeignan et Weil-Barais, 1992 ; Bental *et al.*, 1995).

Ces différents modes de transferts ont été explicités, en particulier par Bental *et al.* (1995), Lemeignan et Weil-Barais (1992), Gaidioz *et al.* (1998), Trellu et Toussaint (1986) et Agabra (1986).

Travail

Dans les articles que nous citons, le travail est présenté sous des angles variés et complémentaires.

Pour Bental *et al.* (1995, p.3), il s'agit d'une définition classique du travail en mécanique²⁷ :

« on considère qu'il y a transfert d'énergie sous forme de travail mécanique quand il y a déplacement d'un objet ou d'une partie d'un objet lors d'une interaction, sous forme de travail électrique quand il y a du courant électrique (déplacement de charges) » (Bental *et al.*, 1995, p.3)

Lemeignan et Weil-Barais (1992, p.182) présentent le travail sous un angle très mathématique, en précisant la manière dont il peut être calculé :

« le travail (W) caractérise le transfert d'énergie entre deux systèmes A et B en interaction-force. Il est la valeur numérique du groupement Fl ; il s'agit d'un travail mécanique. (Nous nous sommes limités au cas où force et déplacement sont de même direction.) Le travail électrique est la valeur numérique du groupement UI_t (interaction source-électron). »

Gaidioz *et al.* (1998, p.33) proposent de définir le travail en deux temps : d'abord, qualitativement, comme « exigeant un déplacement ordonné de matière d'un système ou d'une partie du système », puis quantitativement, « mathématiquement ».

Trellu et Toussaint (1986, p.69) proposent des définitions dans lesquelles ils précisent les conséquences du travail sur les systèmes mis en jeu :

« le travail mécanique [est] le travail des forces exercées par un système sur un autre ; on constate qu'il y a augmentation de l'énergie interne du premier et diminution de celle du second, mais qu'en même temps il y a mise en mouvement ou maintien du mouvement ordonné de la matière » (Trellu et Toussaint, 1986, p.69)

En ce qui concerne le travail électrique, ils indiquent que :

« ce sont des forces de nature électrique qui sont en jeu (...) entre deux systèmes qui échangent de l'énergie, échange accompagné d'une mise en mouvement ordonné ou d'un maintien en mouvement de charges électriques » (Trellu et Toussaint, 1986, p.69)

Nous remarquons que Trellu et Toussaint (1986) et Lemeignan et Weil-Barais (1992) font appel au concept de force pour définir le travail, contrairement à Gaidioz *et al.* (1998) et Bental *et al.* (1993).

Chaleur

Selon Lemeignan et Weil-Barais (1992, p.182), « la chaleur (Q) caractérise le transfert d'énergie entre deux systèmes en contact, à température différente, dans le sens système chaud → système froid, [et] n'est pas directement mesurable », ce qui correspond à une description des phénomènes de conduction. La définition donnée par Trellu et Toussaint (1986, p.69) est comparable, la chaleur étant en plus associée à une modification du système au niveau microscopique :

« le transfert thermique ou chaleur (...) nécessite un contact entre les deux systèmes : il s'accompagne toujours d'un transfert d'agitation désordonnée des particules des deux systèmes dans le voisinage du contact. » (Trellu et Toussaint, 1986, p.69)

27 Ceci figure dans un encadré qui reprend des informations destinées à des élèves de 1re S ; aucune autre définition ou précision n'est apportée par les auteurs dans l'article cité.

On en déduit que Lemeignan et Weil-Barais (1992) et Trelu et Toussaint (1986) identifient la chaleur aux processus de conduction, à l'instar d'Agabra (1986, p.13), selon qui :

« la condition nécessaire et suffisante pour qu'il y ait transfert de chaleur entre deux systèmes est que leur température soit différente », et qui exclut explicitement de la chaleur les phénomènes de convection : « qui ne correspond[ent] pas [à] une interaction purement thermique : il y a déplacement macroscopique, c'est-à-dire travail » (Agabra, 1986, p.13)

Par contre, Agabra considère le rayonnement comme une forme de chaleur, bien qu'ayant lieu « à distance ».

Tout comme les auteurs précédemment cités, Gaidioz et al (1998, p.33) commencent par identifier la chaleur au processus de conduction thermique. Ils précisent que, lors d'un changement d'état, « un système reçoit de l'énergie par mode chaleur sans que sa température varie » (1998, p.33). Ils évoquent ensuite le « cas des fluides », dans lesquels peuvent avoir lieu des courants de convection, qu'ils distinguent de la chaleur et excluent explicitement de leur modèle pour l'enseignement secondaire.

Bental *et al.* (1995), quant à eux, ne précisent pas ce qu'ils entendent par chaleur.

Rayonnement

Trelu et Toussaint (1986, p.69) identifient le transfert radiatif par opposition aux autres transferts (ce qui n'est pas sans rappeler la définition de la chaleur en thermodynamique, voir §2.1) :

« le transfert par rayonnement (...) s'effectue grâce aux ondes électromagnétiques, sans support matériel, et éventuellement sur de très grandes distances. D'une certaine façon on peut dire que tout transfert d'énergie qui n'est pas de l'un des trois autres types (mécanique, électrique ou chaleur) est un transfert par rayonnement, même si historiquement on a souvent inclus le rayonnement dans la chaleur » (Trelu et Toussaint, 1986, p.69)

La définition du rayonnement proposée par Lemeignan et Weil-Barais, quant à elle, est cohérente avec celle-ci, mais moins précise :

« Le rayonnement (R) caractérise le transfert d'énergie entre deux systèmes, émetteur et récepteurs d'ondes électromagnétiques diverses. Les groupements fonctionnels afférents ne sont pas exprimés. (Ils exigeraient l'introduction des concepts de champ électrique et de photon). » (Lemeignan et Weil-Barais, 1992, p.182)

Gaidioz *et al.* (1998, p.33) disent du rayonnement qu'il est « de nature électromagnétique [et] ne s'accompagne d'aucun transport de matière », puis l'illustrent par les phénomènes d'incandescence, qu'ils appellent également « rayonnement thermique ».

Divergences et convergences concernant les modes de transferts

Bien que les transferts soient envisagés dans leur globalité sous un angle similaire à celui de la thermodynamique, nous constatons que *travail* et *chaleur* n'ont pas le même sens en didactique et en thermodynamique, ce qui donne lieu à une – voire plusieurs – autre classification des modes de transferts.

Nous avons noté de fortes divergences concernant la définition et la nature des termes « chaleur » et « rayonnement ». Si la définition du travail reste consensuelle, nous avons mis en évidence deux approches distinctes pour ce mode de transfert, qui peut être présenté en lien avec la notion de force, ou de façon plus autonome.

Dans la suite de ce manuscrit, nous utiliserons les mots et expressions qui figurent dans ce paragraphe en leur donnant le sens qu'ils prennent généralement en didactique, même s'il s'éloigne de leur sens scientifique. Nous prenons en considération trois types de transfert d'énergie : travail, chaleur (incluant conduction et convection) et rayonnement.

Formes d'énergie

Le fait qu'un système contienne une certaine quantité d'énergie est dû à son état, et plus particulièrement à certaines de ses propriétés. Par exemple, plus sa température est élevée, plus sa vitesse est élevée, plus son altitude²⁸ est élevée, plus sa charge électrique est importante (en valeur absolue), plus il a d'énergie. La nature de sa composition chimique lui confère également une certaine quantité d'énergie. Pour ces raisons, il est courant d'attribuer à un système plusieurs formes d'énergie distinctes, concepts *classificatoires*, à ne pas confondre avec l'énergie, en tant que concept *quantitatif* (voir §1.1).

L'idée de formes d'énergie ne fait toutefois pas l'unanimité en didactique de la physique : certains considèrent qu'associer plusieurs formes différentes à l'énergie conduit à ne plus la considérer comme une grandeur unificatrice (Falk *et al.* 1983 ; Ellse, 1988 ; Millar, 2005 ; Lancor, 2014). Ses partisans, eux, présentent ces formes comme autant de manières de décrire l'énergie lorsqu'elle est susceptible d'être libérée en entraînant une modification de l'état du système. Par exemple, si la libération d'une certaine quantité d'énergie contenue dans un système conduit à une diminution de sa température, on associe *rétrospectivement* une certaine forme à cette énergie qui a été libérée (qui sera appelée « énergie thermique » pour certains, « énergie de température » pour d'autres, « énergie interne » ou encore « énergie cinétique microscopique »).

Les listes de formes d'énergie sont nombreuses et variées. Nous en présentons ci-dessous trois en particulier : celle qui a été proposée par Lemeignan et Weil-Barais en 1992 dans l'étude dont nous avons parlé précédemment (paragraphe *Transferts d'énergie*), celles utilisées par l'équipe COAST (Gaidioz *et al.*, 1998), et celles proposées par Vince et Tiberghien (2014, 2015), issues d'un travail collaboratif entre chercheurs et enseignants.

Dans leur étude, Lemeignan et Weil-Barais (1992, p.181) considèrent six formes d'énergie, deux *cinétiques* et quatre *potentielles* (la distinction cinétique / potentielle étant en cohérence avec celle de la physique, voir §2.2) :

- l'énergie cinétique (liée à la vitesse macroscopique du système par rapport à un référentiel déterminé) ;
- l'énergie de température d'un gaz ou d'un fluide (qui caractérise l'agitation des particules qui le composent) ;
- l'énergie potentielle de niveau (associée à un système Terre-objet) ;
- l'énergie potentielle chimique (associée à la composition chimique du système) ;

28 On parle d'altitude pour un système qui se situe au voisinage d'un astre dont il subit l'attraction gravitationnelle.

- l'énergie potentielle nucléaire (liée à la composition du noyau des atomes qui constituent le système) ;
- l'énergie potentielle de déformation (qui caractérise les ressorts).

D'un point de vue macroscopique, Gaidioz *et al.* (1998) proposent de distinguer l'énergie *cinétique*, qui « dépend de la vitesse du système », et les énergies *potentielles*, « mot exprimant la potentialité d'un mouvement ultérieur », qui dépendent des différentes « parties de la Physique (...) : les formes d'énergie électrique, magnétique, chimique... ». Dans cette catégorisation, l'énergie liée à la température est considérée comme *potentielle*. Les auteurs soulignent que, si on adopte un point de vue microscopique :

« "il n'y a finalement que deux formes d'énergie, cinétique et potentielle, quelles que soient les diverses *interactions fondamentales* que l'on est amené à distinguer [Dictionnaire de la physique Mathieu, Kastler, Fleury -Masson 1983]". En particulier, l'énergie thermique s'interprète comme de l'énergie cinétique désordonnée des particules qui composent un système. » (Gaidioz *et al.*, 1998)

Dès lors, il est impératif de préciser quelle est la classification choisie (macroscopique ou microscopique) lorsqu'on évoque une forme d'énergie.

En 2014, Vince et Tiberghien coécrivent un article où il est question d'une séquence d'enseignement de l'énergie pour des élèves de 1^{re} S, issue d'un travail collaboratif entre chercheurs et enseignants (groupe *Sesames*, voir le site pegase.inrp.fr). Tiberghien a fait partie de l'équipe COAST et a collaboré à l'élaboration du modèle de l'énergie qui figure dans l'ouvrage de Gaidioz *et al.* (1998), dont elle fait partie des auteurs. Pour ces raisons, nous avons choisi de nous intéresser aux formes d'énergie proposées dans cet article. Tout comme Gaidioz *et al.* (1998), les auteurs proposent une double classification. La première regroupe cinq formes d'énergie : mécanique, thermique, électrostatique, chimique et nucléaire ; dans la seconde les énergies peuvent avoir une forme cinétique ou potentielle. Toutes ces formes sont évoquées et présentées comme des « savoirs disciplinaires », mais ne sont pas définies ou justifiées. En 2015, les mêmes auteurs expliquent ces choix :

« En physique, il nous semble qu'une classification [comme celle qui est proposée dans les nouveaux programmes de collège] juxtaposant les adjectifs *cinétique*, *potentielle*, *chimique*, *nucléaire* et *interne* (nous avons enlevé *électrique*, mais on pourrait ajouter *électrostatique*...) n'est pas tout à fait homogène, ou nécessite au moins un peu d'explications. Il convient d'abord de préciser qu'on parle ici d'énergies macroscopiques (même si l'énergie interne résulte de contributions microscopiques, mais il est raisonnable au collège de ne pas entrer dans ce débat). À ce stade, le mot *interne* pourrait être avantageusement remplacé par le mot *thermique*, même si c'est une approximation. Le terme *thermique* est d'ailleurs le seul pouvant être utilisé à la fois pour une forme d'énergie et pour un mode de transfert, ce qui peut être source de difficultés²⁹. Si on reste au niveau macroscopique, on peut alors spécifier que l'énergie *mécanique* est pour partie *cinétique* et pour partie *potentielle*. » (Vince et Tiberghien, 2015, p.1107-1108, italique des auteurs)

29 On pourrait se poser la question du mot « mécanique », qui est également associé à la fois à une forme d'énergie et à un type de transfert.

On peut regretter que les termes *cinétique*, *potentielle* et *mécanique* ne soient pas plus précisément définis, *a fortiori* pour un enseignement au collège ; il nous est impossible d'interpréter avec certitude ce à quoi Vince et Tiberghien font référence lorsqu'ils les utilisent.

À première vue, les formes d'énergie proposées en didactique et pour l'enseignement sont nombreuses, variées, et ne correspondent pas à un classement rigoureux et complet. En particulier, en dehors de sa composante liée à la température, on constate que l'énergie interne du système n'est pas prise en considération dans cette liste : tout se passe comme si un élastique étiré avait la même énergie qu'un élastique au repos³⁰ et comme si une masse m de glace à 0°C avait la même énergie qu'une masse m d'eau liquide à 0°C.

Comme dit au §2.3, nous faisons le choix de ne pas privilégier de catégorisation de formes d'énergie : nous privilégions le fait que les formes mentionnées soient clairement définies et que leurs descriptions physiques et mathématiques soient en accord avec le principe de conservation de l'énergie.

Conversion, transformation d'énergie et modification de la forme d'énergie

Nous avons vu dans les paragraphes précédents qu'il était possible de distinguer différents types de transferts d'énergie entre systèmes et de catégoriser les formes d'énergie contenues dans un système. De ce fait :

- (1) L'énergie peut changer de forme au sein d'un système ;
- (2) L'énergie peut changer de forme en changeant de système ;
- (3) Le(s) type(s) de transfert « entrant » dans un système peu(ven)t être différent(s) des types de transferts « sortant » de ce système.

Nous n'avons pas trouvé de dénominations claires et consensuelles pour ces caractéristiques.

La propriété de « transformation » ou de « conversion » est souvent mentionnée (Bental *et al.*, 1995 ; Bécu-Robinault, 1997 ; Gaidioz *et al.*, 1998 ; Vince et Tiberghien, 2012, 2015 ; Ducourant, 2019) mais est rarement définie. Elle est associée dans ces écrits à l'idée de « transformateur » ou de « convertisseur », système qui modifie le type de transfert d'énergie : nous faisons donc l'hypothèse qu'elle fait référence à la caractéristique (3), ce que confirme Bécu-Robinault (1997, p.27). Cette propriété, initialement appelée « transformation » en didactique (Bental *et al.*, 1995 ; Bécu-Robinault, 1997 ; Gaidioz *et al.*, 1998), a changé de dénomination notamment pour éviter qu'il y ait confusion entre les transformateurs *électriques* et les transformateurs tels que définis ici (Bécu-Robinault, communication personnelle, 3 janvier 2022, confirmé par Vince et Tiberghien, 2012, 2015 et Ducourant, 2019). À l'instar de ces auteurs, nous l'appellerons *conversion* dans la suite de notre travail.

Le fait que l'énergie puisse changer de forme au sein d'un système est souvent mentionné, en particulier en mécanique, lorsque l'énergie cinétique d'un système devient de l'énergie potentielle de pesanteur (et inversement). À l'instar de Ducourant (2019), nous choisissons d'appeler cette

30 Même si on peut supposer que l'élasticité soit associée à l'énergie potentielle de déformation, elle n'est associée qu'aux ressorts par Lemeignan et Weil-Barais (1992).

propriété *transformation*, puisqu'elle fait référence au changement de *forme* d'énergie dans un système.

Nous assumons que les définitions que nous venons de choisir sont délicates, puisqu'elles vont à l'encontre de celles de la physique, où le changement de forme d'énergie au sein d'un système est habituellement appelé *conversion* (voir §2.2, *L'énergie en mécanique classique*) et où une *transformation* est l'événement qui a lieu lorsqu'un système passe d'un état thermodynamique à un autre (voir §2.1).

Nous n'avons pas trouvé de références dans lesquelles la caractéristique (2) serait mentionnée. Nous pensons toutefois qu'elle revêt un certain intérêt : bien que l'énergie se conserve, la forme d'énergie présente à un instant donné dans un système donné n'est pas nécessairement la même que celle qui sera présente plus tard et ailleurs (et que celle qui était présente avant et encore ailleurs). Ceci est utile pour une bonne compréhension du principe de dégradation de l'énergie : toutes les formes d'énergie ne sont pas *modifiables* de la même manière ; quelle que soit la forme d'énergie « utilisée », on trouve une augmentation d'énergie interne quelque part (déformation, augmentation de température, changement d'état). Nous choisissons d'appeler cette caractéristique *modification*.

Stockage de l'énergie

Une propriété qui n'est pas formalisée quand on décrit le concept d'énergie d'un point de vue scientifique (chap.2) lui est souvent attribuée pour l'enseignement : il s'agit de son *stockage* (voir ci-avant, *Définitions de l'énergie pour l'enseignement et en didactique de la physique*). En effet, lorsqu'on considère l'énergie sous un angle thermodynamique, on s'intéresse d'une part à des systèmes dans des états bien déterminés (en général, en début et en fin de transformation³¹) et d'autre part à l'énergie qui a été transférée entre ces systèmes au cours de la transformation³¹. Dans ce contexte, l'énergie est une grandeur qui peut être associée à chaque instant à tout système : en ce sens, elle est exclusivement *stockée* dans ces systèmes. De façon implicite, c'est ce parti-pris qui est le plus souvent adopté en didactique quand on parle d'énergie dans un contexte d'enseignement dans le secondaire (comme pour Ellse, 1988 ; Millar, 2005 ; Vince et Tiberghien, 2015).

Cette caractérisation de l'énergie, d'un point de vue sémantique, revient à considérer les systèmes comme des contenants et l'énergie comme un contenu, plutôt que comme une grandeur. Le stockage de l'énergie cinétique – toujours d'un point de vue sémantique – pose question.

Synthèse des caractéristiques de l'énergie pour l'enseignement

Dans ce paragraphe, nous avons décrit l'ensemble des caractéristiques que l'on peut attribuer à l'énergie dans un contexte scolaire, en nous basant en particulier sur des travaux de recherche en didactique. Le Tableau 1 ci-après récapitule ces caractéristiques et les définitions que nous leur avons attribuées.

31 Au sens de la thermodynamique

Caractéristique	Description
Unificatrice	L'énergie relie entre eux les différents domaines scientifiques
Grandeur	L'énergie est une grandeur à laquelle on peut attribuer une valeur et une unité
Abstrait	L'énergie est un concept abstrait formel
Puissance	Un débit d'énergie peut être associé à un transfert d'énergie
Conservation	Entre deux instants, la quantité d'énergie totale ne varie pas
Conservation locale	À un instant donné, les flux d'énergie qui entrent dans un système dont l'énergie ne varie pas sont égaux aux flux d'énergie qui en sortent
Dégradation	Au cours d'une transformation, la qualité de l'énergie ne peut que se dégrader : l'énergie thermique augmente, et cette forme d'énergie est « moins utilisable » que les autres
Transfert	Si on considère deux systèmes distincts, il peut y avoir transfert d'énergie d'un système vers l'autre
Formes	Certaines des grandeurs mesurables associées au système lui confèrent une certaine quantité d'énergie particulière
Conversion	Le type de transfert peut être modifié
Transformation	L'énergie peut changer de forme au sein d'un système
Modification	La forme d'énergie cédée par un système est différente de la forme d'énergie reçue par l'autre système
Stockage	L'énergie est contenue dans des systèmes

Tableau 1 : caractéristiques de l'énergie pour l'enseignement en sciences physiques

3.2. Difficultés d'appropriation des modèles scientifiques scolaires de l'énergie

Nous avons mis en évidence que le concept d'énergie est potentiellement difficile à comprendre et à assimiler, en particulier parce qu'il est abstrait, difficile à définir, polysémique et intimement lié à l'idée de conservation. L'ensemble des difficultés liées à la compréhension de ce concept dans un contexte scolaire ont donné lieu à de nombreux travaux, depuis les années 1970 jusqu'à nos jours. Dans ce paragraphe, nous allons revenir sur les principaux résultats qui en sont issus : l'énergie est souvent confondue avec d'autres grandeurs physiques, elle est vue comme une substance, associée particulièrement à certains types d'objets au lieu de revêtir un caractère unificateur. La dégradation et la conservation de l'énergie sont souvent mal comprises : tout se passe comme si l'énergie pouvait être consommée, produite, perdue, etc. Tout ceci entre en résonance avec le concept *sociétal* d'énergie, que nous avons décrit plus haut (§3.1, *L'énergie au quotidien*).

Une grandeur physique souvent confondue avec d'autres grandeurs

L'énergie est une grandeur très souvent confondue en physique avec d'autres grandeurs telles que la puissance, la force, la vitesse, voire le travail ou l'électricité – bien que cette dernière ne soit pas une grandeur. Ceci s'explique en grande partie parce que c'est un concept formel et difficile à mettre en relation avec d'autres grandeurs physiques, surtout lorsque ces dernières sont également formelles et abstraites.

Pour illustrer cela, nous pouvons citer l'article de Watts (1983), dans lequel il met en lumière certaines conceptions d'élèves relatives à l'énergie. Des interviews ont été faites au cours desquelles des images représentant des phénomènes divers ont été présentées à des élèves (environ 40 élèves âgés de 14 à 18 ans), qui devaient dire en quoi ces images illustrent leur conception³² de l'énergie.

32 Nous utilisons ici le mot « conception » dans son sens commun.

Avant même de présenter les résultats de son analyse, Watts précise que certains élèves utilisent pendant les entretiens les mots « force » et « puissance » à la place d'« énergie », comme s'il s'agissait de synonymes. Il ne précise pas combien d'élèves cela concerne.

En 1984, Duit analyse les réponses d'un questionnaire qui a été complété par plusieurs centaines d'élèves philippins, allemands et suisses de 11 à 16 ans, avant ou après enseignement selon les classes. Parmi les questions de ce questionnaire, il est demandé aux élèves de définir ou de décrire ce que signifient les mots énergie, travail, puissance et force, et d'illustrer cela par des exemples. Les auteurs concluent que les confusions entre l'ensemble de ces grandeurs sont fréquentes et persistent après enseignement.

Les deux études dont nous avons fait mention ici sont anciennes, mais les résultats qu'elles apportent ne semblent pas avoir été remis en cause depuis ; nous ne disposons pas de données ou d'études quantitatives plus récentes relatives aux confusions entre l'énergie et d'autres grandeurs physiques.

Une grandeur associée à certains types d'objets en particulier

L'article de Watts (1983) dont nous avons parlé dans le paragraphe précédent met en évidence l'existence de certains cadres alternatifs (« alternative frameworks ») pour l'énergie. Ce sont des manières de penser et de parler de l'énergie dans sa globalité, qui résultent pour ceux qui les utilisent d'une tentative de concilier des idées initiales non-scientifiques et des connaissances liées à un contexte scolaire (Trumper *et al.*, 2000). Watts (1983) met en évidence en particulier que l'énergie est souvent associée à certaines catégories d'objets spécifiques. Selon les points de vue considérés, elle n'est associée qu'à des objets en mouvement, ou alors exclusivement à des objets techniques (qui ont *besoin* d'énergie ou qui *fabriquent* de l'énergie), ou encore uniquement aux êtres humains (une personne pouvant avoir de l'énergie, contrairement à un objet).

Dans leur article de 2012, Chabalengula et ses collègues proposent une synthèse de l'ensemble des conceptions relatives à la compréhension de l'énergie et en lien avec la biologie (mises en évidence et quantifiées dans des travaux de recherche entre 1984 et 2010). Cette synthèse montre également une forte vision de l'énergie comme anthropocentrée, anthropomorphique, spécifique au vivant, ou encore associée exclusivement au mouvement.

Le fait de n'associer l'énergie qu'à certains types d'objets ou à certains phénomènes ne permet pas d'avoir accès à la dimension unificatrice et universelle de ce concept.

Une vision substantialiste de l'énergie

Dans les travaux de Watts (1983), il a été mis en évidence que l'énergie peut être considérée par les élèves comme une substance qui s'écoule, ou encore comme un déchet, assimilable à de la transpiration, de la fumée ou des gaz d'échappement.

D'une façon moins évidente, certains auteurs soulignent que dire de l'énergie qu'elle se stocke amène à considérer qu'il s'agit d'une substance et non d'une grandeur abstraite (Ellse, 1988 ; Bächtold *et al.*, 2014). Après avoir analysé un grand nombre de métaphores possibles pour l'enseignement de l'énergie, Lancor (2014) pose la question de la validité de ces métaphores, dans lesquelles l'énergie est nécessairement substantialisée ; elle conclut que si l'utilisation de

métaphores implique une considération matérielle pour l'énergie, cela n'a pas nécessairement un impact négatif sur la compréhension du concept d'énergie et de son abstraction.

Enfin, n'oublions pas qu'il est habituel d'assimiler l'énergie à la substance qui la contient, en particulier dans la vie quotidienne (§3.1, *L'énergie au quotidien*) ; il est donc attendu que de telles confusions soient aussi habituelles pour les élèves (nous y reviendrons plus loin).

Une appropriation imparfaite du principe de conservation de l'énergie

Dans l'étude de Watts (1983) mentionnée précédemment, il a été mis en évidence que pour beaucoup d'élèves, l'énergie ne se conserve pas : elle peut être produite, perdue, consommée, elle peut s'user ; elle est parfois décrite comme une sorte de déchet qui est produit puis disparaît. Cette vision de l'énergie est particulièrement marquée lorsque l'énergie est abordée sous un angle sociétal, non exclusivement scientifique (même dans un contexte scolaire). Pour illustrer nos propos, nous pouvons citer les travaux de Bodzin (2012), qui réalise une étude ayant pour objectif de rendre compte des connaissances de 143 élèves de 13 à 15 ans relatives aux sources d'énergie et à leur utilisation : dans cette étude en général et en particulier dans le questionnaire proposé aux élèves, l'énergie est présentée comme quelque chose qui se produit, se consomme, etc.

En 2011, Herrmann-Abell et DeBoer analysent les réponses données par plusieurs milliers d'élèves et d'étudiants (du collège à l'université) à un questionnaire à choix multiples relatif à la transformation de l'énergie, aux transferts d'énergie et à la conservation de l'énergie. Les difficultés liées à la conservation de l'énergie sont les plus fortes, bien qu'elles se réduisent lorsque le niveau scolaire augmente. Parmi les réponses possibles, celles qui suggèrent une création ou une destruction d'énergie sont choisies par une part significative des élèves, voire des étudiants. Les auteurs mettent aussi en évidence que les principes généraux sont mieux compris que leur application, et en particulier que le principe général de conservation de l'énergie est mieux compris que son application à une situation réelle concrète.

Une étude de Chabalengula et ses collègues (2012) met en évidence la compréhension de l'énergie qu'ont 90 étudiants de biologie en première année universitaire en Afrique du Sud en analysant leurs réponses à un questionnaire écrit. Il en ressort que la conservation de l'énergie pose particulièrement problème ; par exemple, 92 % d'entre eux ont considéré comme correcte la réponse erronée – car consumériste – « if you go jogging, energy is used up » (Chabalengula *et al.*, 2012, p.257).

Enfin, comme le font remarquer Pintò et ses collègues (2005), dans plusieurs langues dont le français et l'anglais, la *conservation* de l'énergie peut être entendue comme *économie* de l'énergie : en effet, le verbe *conserver* (to conserve) signifie aussi *stocker* ou *préserver* (to save), de la même manière qu'en anglais, *conservation* peut être entendu dans le sens de *saving*. Dans les deux langues, soulignons que le sens donné au mot *conservation* diffère complètement selon que l'on parle de *conservation de l'énergie* ou de *conservation des ressources* (Tatar et Oktay, 2007, p.80).

Il est donc probable que l'on puisse être confrontés, dans un contexte scolaire, à une représentation du principe de conservation de l'énergie dans laquelle on associe au mot « conservation » un sens finalement plus proche de celui de la dégradation, *conserver* l'énergie revenant alors à *économiser ses formes les plus utilisables*.

Confusions entre formes d'énergie, transferts d'énergie et sources d'énergie

En premier lieu, rappelons que les propriétés associées au concept scolaire d'énergie sont rarement définies avec précision et que les mots qui les désignent ne sont pas toujours utilisés dans un sens unique et cohérent (§3.1, *Définitions de l'énergie pour l'enseignement et en didactique de la physique*).

Bien que nous n'ayons pas trouvé d'étude significative à ce sujet, la confusion entre source d'énergie (c'est-à-dire la matière qui compose l'objet assimilé à un système qui contient de l'énergie) et énergie – ou forme d'énergie – est reconnue en didactique (Bächtold *et al.*, 2014). Cette adhérence entre énergie et source d'énergie est très commune dans la vie quotidienne, où le pétrole, le charbon et le gaz naturel sont souvent présentés – notamment par les médias – comme « de l'énergie ».

Les transferts d'énergie (chaleur, travail ou électricité) sont souvent assimilés à des formes d'énergies, ou considérés comme des formes d'énergie, comme le soulignent Cotignola et ses collègues (2002).

Certains auteurs, pour lesquels le modèle scolaire de l'énergie ne peut comporter que des formes d'énergie *stockables*, considèrent que de telles confusions peuvent être mises en évidence par des analyses de programmes ou de manuels dans lesquels, par exemple, l'énergie électrique et l'énergie lumineuse sont présentées comme des formes d'énergie parmi d'autres (voir Bächtold *et al.*, 2014 ; Morge et Buty, 2014 ; Vince et Tiberghien, 2012, 2015). Ces auteurs adoptent un point de vue thermodynamique : ils prennent en considération un système classique macroscopique (auquel ils attribuent des formes d'énergie) et les transferts qui quantifient les échanges d'énergie reçue ou/et émise par le système. Dans ce contexte, la distinction entre formes d'énergie – présentées comme associées, contenues ou stockées dans un système – et transferts d'énergie est fondamentale, et, par construction, l'énergie ne peut être ni lumineuse, ni électrique (dans un sens électrocinétique, et non électrostatique).

Difficultés de compréhension du concept d'énergie chez les enseignants

Plusieurs études ont mis en évidence que les conceptions des enseignants de primaire sont globalement comparables à celles des élèves que nous venons de détailler (Trumper, 1998 ; Trumper *et al.*, 2000 ; Kruger, Palacio et Summers, 1992 ; Kruger, 1990).

Selon une étude menée en Israël et publiée en 1998 par Trumper, elles touchent également les futurs enseignants du secondaire, qui utilisent des *alternative frameworks*³³ (Watts, 1983) pour l'énergie en même temps ou à la place du sens qui lui est donné dans l'enseignement scientifique. Trumper (1998) montre que la plupart des 25 futurs enseignants de sa cohorte pensent que l'énergie est une entité concrète et non une idée abstraite, n'acceptent pas l'idée de dégradation de l'énergie, et confondent les concepts d'énergie et de force.

33 Comme dit précédemment, ce sont des manières de penser et de parler de l'énergie dans sa globalité, qui résultent pour ceux qui les utilisent d'une tentative de concilier des idées initiales non-scientifiques et des connaissances liées à un contexte scolaire (Trumper *et al.*, 2000).

En ce qui concerne les conceptions relatives à la dégradation de l'énergie, Pintò et ses coauteurs (2005) montrent qu'elles sont fortement présentes chez les enseignants du secondaire espagnols qu'ils observent en classe pendant leurs cours (panel de 20 enseignants qui exercent ce métier depuis 4 à 20 ans). Les chercheurs rappellent et soulignent que les *alternative frameworks* des enseignants du secondaire interfèrent avec la compréhension scientifique de leurs élèves, ce qui, *a priori*, rend difficile l'acquisition de nouvelles notions pour ces derniers. D'après cette étude, lorsque la dégradation est enseignée, elle est souvent présentée comme un dégagement de chaleur indésirable et est rarement expliquée et décrite comme une augmentation locale de l'énergie interne causée par des frottements.

3.3. Quelles recommandations pour l'enseignement de l'énergie ?

Nous venons de voir quelles sont les difficultés majeures auxquelles sont confrontés les élèves et les étudiants dans leur appropriation du concept d'énergie dans un contexte de classe (c'est-à-dire : par l'intermédiaire de modèles scientifiques scolaires). Pour y remédier, plusieurs recommandations ont été faites pour l'enseignement, à commencer par des propositions pour une prise en charge directe de ces difficultés dans les années 1980 (Trellu et Toussaint, 1986 ; Koliopoulos et Tiberghien, 1986).

Dans les prochains paragraphes, nous allons décrire deux des principales^{34, 35} approches qui ont été élaborées à la suite de ces propositions : l'approche pluridisciplinaire, plutôt rare et peu documentée, et l'approche par la modélisation et par les chaînes énergétiques, proposée par Lemeignan et Weil-Barais en 1992 et 1993, puis reprise, complétée et formalisée par Gaidioz *et al.* en 1998³⁶.

Points de consensus et questions encore ouvertes

Avant tout, soulignons que l'idée d'un enseignement progressif de l'énergie sur plusieurs années est fortement consensuelle (Bächtold *et al.*, 2014 ; Lee et Liu, 2010 ; Colonnese *et al.*, 2012 ; Neumann *et al.*, 2013), en commençant par une approche qualitative (Millar 2005 ; Colonnese *et al.*, 2012) dès l'enseignement primaire (Lemeignan et Weil-Barais, 1993 ; Boyer et Givry, 2016). Dans un premier temps, l'énergie n'est pas abordée comme une grandeur, mais par certaines de ses propriétés – comme le transfert, la transformation, la conversion et la modification ; l'accent est mis sur le monde matériel et sur l'expérimentation, sans une référence forte à la théorie de l'énergie, ou à l'énergie en tant que concept.

Nous avons vu que le principe de conservation de l'énergie est particulièrement difficile : comme le soulignent Lemeignan et Weil-Barais (1992, 1993) ainsi que Bächtold et ses collègues (2014), son apprentissage nécessite comme prérequis une bonne compréhension des autres propriétés de

34 Mentionnée de façon marginale par Guedj et Mayrargue (2014, p.36), l'approche incluant des éléments d'histoire des sciences est trop peu documentée pour que nous ayons jugé utile de l'évoquer ici.

35 Nous ne les opposons pas entre elles : il est parfaitement envisageable d'utiliser un modèle scientifique scolaire de l'énergie qui s'appuie sur ces deux approches.

36 Bien que Gaidioz *et al.* (1998) ne fassent pas explicitement référence aux travaux de Lemeignan et Weil Barais (1992, 1993), certaines similarités (de temps, d'espace et de contenu) entre les approches nous permettent de supposer qu'ils se sont inspirés de ces travaux.

l'énergie. En particulier, la conservation de l'énergie ne peut pas être correctement abordée tant que l'énergie n'est pas vue comme une grandeur physique, c'est-à-dire comme quelque chose de quantifiable.

En ce qui concerne la dégradation de l'énergie, les auteurs préconisent de l'aborder en même temps que sa conservation (Millar, 2005), voire de se servir de la dégradation de l'énergie comme d'un levier permettant d'accéder au principe de conservation (Solomon, 1985 ; de Hosson, 2016). Duit (1981) propose un enseignement de la conservation par la dégradation, avec la mise en évidence que, dans les processus réels, l'énergie est conservée mais devient progressivement de moins en moins « utile ». Pour Solomon (1985), commencer par évoquer la dégradation avant d'aborder la conservation est plus cohérent avec les idées initiales des élèves, ce qui leur permet *in fine* de mieux comprendre la conservation de l'énergie. Évoquer au même moment dégradation et conservation est aussi particulièrement pertinent d'un point de vue expérimental : la conservation de l'énergie est toujours délicate à mettre en évidence (ou à vérifier) expérimentalement, l'énergie dégradée étant difficile à quantifier.

En 2014, Bächtold et ses coauteurs listent les principaux points sur lesquels il n'y a pas de consensus concernant l'enseignement de l'énergie : faut-il privilégier une entrée par les transformations/conversions/modifications ou une entrée par les transferts ? Est-il nécessaire de commencer par définir les systèmes ? Est-il pertinent de commencer par une approche substantialiste de l'énergie, comme le proposent Falk *et al.* (1983), ou faut-il éviter de conforter les élèves dans une vision matérielle de l'énergie ?

Approche pluridisciplinaire³⁷

L'énergie est un concept unificateur par essence : à l'instar de Hestenes (2013), Bächtold *et al.* (2014) soulignent l'importance de mettre en avant cette dimension unificatrice, en étudiant le concept d'énergie à travers une grande diversité de situations, liées à de multiples domaines scientifiques (mécanique, circuits électriques, vivant, etc.) Cet aspect unificateur peut aussi être mis en évidence par un enseignement conjoint de l'énergie à travers plusieurs disciplines scolaires, comment le proposent Koliopoulos et Tiberghien (1986) en conclusion d'une revue bibliographique portant sur l'enseignement de l'énergie au collège.

L'idée d'un enseignement de l'énergie par plusieurs disciplines scolaires paraît le plus souvent liée à la question du défi énergétique (Koliopoulos et Tiberghien, 1986 ; Darot, 1986 ; Bécu-Robinault et Tiberghien, 1998). *A minima*, l'enseignement de l'énergie de façon cohérente – voire concertée – entre plusieurs disciplines scolaires nécessite l'utilisation d'un vocabulaire commun (Bruguière *et al.*, 2002). Pour que le concept d'énergie soit compris, accepté et assimilé par les élèves, il doit y avoir cohérence entre le sens qu'il prend dans la vie quotidienne de l'élève et celui ou ceux qu'il prend dans sa vie scolaire, toutes disciplines confondues, ce qui n'est généralement pas le cas, comme nous l'avons vu au §3.1 et comme le confirment Darot (1986), Bruguière *et al.* (2002), Kurnaz et Sağlam-Arslan (2009), Vince et Tiberghien (2012), Lancor (2014) et Morge et Buty (2014).

En 1986, Darot décrit une expérimentation d'enseignement pluridisciplinaire (mêlant sciences physiques, histoire et géographie, sciences naturelles, sciences économiques et sociales) de

³⁷ Nous ne ferons pas ici la distinction entre *pluridisciplinarité*, *interdisciplinarité* et *multidisciplinarité*

l'énergie en collège et en lycée, mise en œuvre au début des années 1980 et pendant plusieurs années consécutives. Elle souligne qu'en plus du travail effectué par les concepteurs des séquences, ce projet a nécessité une implication conséquente de la part des enseignants engagés, notamment pour établir une progression cohérente et un vocabulaire commun. Les résultats de ce projet ont paru prometteurs, mais n'ont pas pu être mis en évidence :

« Les meilleures performances relatives des élèves des classes expérimentales sont encourageantes, mais assez réduites ; cela peut s'expliquer par les conditions matérielles dans les établissements scolaires qui ont trop souvent empêché que les équipes interdisciplinaires soient à la fois complètes, agissent au niveau des mêmes élèves et ceci en continuité sur deux années scolaires. » (Darot, 1986, p.122)

Malgré cela, nous n'avons pas trouvé de traces d'un élargissement ou d'une reproduction de ce projet dans les années qui ont suivi.

En 2006, un enseignement commun de sciences et technologies (EIST) en classe de 6^e a été proposé dans une cinquantaine de collèges volontaires, avant d'être étendu à l'ensemble des collèges de France quelques années plus tard (2011, MEN). Cela a conduit à la possibilité d'un enseignement conjoint du concept d'énergie en physique-chimie, sciences de la vie et de la Terre et technologie, qui n'a, à notre connaissance, pas donné lieu à une évaluation permettant de déterminer dans quelle mesure il pouvait améliorer les apprentissages. Coquidé *et al.* (2013) et Viennot (2013) ont émis des réserves quant à l'efficacité de ce dispositif, où la pluridisciplinarité envisagée sur le papier a souvent laissé place à une « juxtaposition de contributions disciplinaires » (Coquidé *et al.*, 2013).

En 2014, Lancor recense et décrit six métaphores conceptuelles de l'énergie, qui permettent d'éclairer ce concept sous des angles divers de façon cohérente, en vue d'un apprentissage pluridisciplinaire de l'énergie. L'autrice considère que toutes ces représentations sont complémentaires et forment un ensemble cohérent qui donne une image globale de l'énergie. En conclusion, elle pense qu'il est préférable de ne pas chercher une modélisation unique et commune adaptée à tous les contextes (inexistante), mais d'accepter que ces différences modélisations coexistent en cohérence les unes avec les autres, en utilisant la mieux adaptée selon le contexte.

Approche par la modélisation et les chaînes énergétiques

À la fin des années 1980, une approche de l'énergie par la modélisation³⁸ est proposée pour l'enseignement en classe de 1^{re} S par Lemeignan et Weil-Barais (1992, 1993) et donne lieu à une expérimentation pendant l'année scolaire 1987-1988. Dans leurs articles, les auteurs proposent un modèle scientifique scolaire de l'énergie, qu'ils décrivent plus particulièrement en 1992. L'accent est mis sur les liens à établir entre des situations expérimentales et leur représentation théorique sous forme de chaînes énergétiques, selon une méthodologie particulière.

L'énergie est présentée aux élèves comme une grandeur physique, « forme numérique significative de tout groupe de systèmes, obtenue comme résultat d'une mesure, assortie d'un principe de conservation » (Lemeignan et Weil-Barais, 1992, p.176).

38 Il s'agit d'une approche par la modélisation présentée en tant que telle, formalisée.

Un très grand nombre de situations expérimentales sont proposées aux élèves, l'objectif étant de leur faire représenter les phénomènes observés ou évoqués afin de répondre à des questions relatives au fonctionnement d'objets, à leur « contenu énergétique », au transfert entre objets, à l'état d'énergie des systèmes et au transfert d'énergie entre systèmes (p.177). Un symbolisme est développé pour représenter quatre types de systèmes : le système *source* (système initial), les systèmes *transformateurs*³⁹ d'énergie (systèmes intermédiaires), le système « *poubelle* » (système final), et les systèmes *réservoirs*³⁹, qui stockent localement et momentanément l'énergie, et qui font partie des systèmes *transformateurs*. Les transferts d'énergie entre systèmes sont représentés dans des chaînes « *pendant* », qui montrent un instantané de la situation ; les variations d'énergie dans les systèmes sont représentées dans des chaînes « *avant-pendant-après* », qui montrent une évolution temporelle de la situation. Nous reviendrons plus en détail sur ces chaînes dans le chapitre suivant.

Suite à cette expérimentation et à la publication de ces articles, de nombreux chercheurs tendent à développer l'utilisation des chaînes énergétiques dans l'enseignement de l'énergie en France, ce qui se traduit par un grand nombre de travaux où des chaînes énergétiques sont explicitées et mises en avant, comme dans ceux de Tiberghien (1994), Bental *et al.* (1995), Devi *et al.* (1996), Bécu-Robinault (1997). Une formalisation nouvelle des chaînes énergétiques est proposée par un collectif d'enseignants de sciences physiques et de chercheurs en didactique des sciences (Gaidioz *et al.*, 1998), dans un ouvrage qui a pour objectif de promouvoir et de diffuser un modèle scientifique scolaire de l'énergie prenant appui sur la représentation des phénomènes énergétiques par des chaînes énergétiques. Une grande place est accordée aux expérimentations, indispensables dans une approche de l'énergie par la modélisation. La méthode et le formalisme proposés diffèrent de ceux de Lemeignan et Weil-Barais (1992, 1993) ; en particulier, les systèmes considérés sont classés en *réservoirs* d'énergie (dont la quantité d'énergie est susceptible de varier) et *transformateurs*³⁹ d'énergie (dont la quantité d'énergie ne varie pas). Bien qu'ayant encore subi quelques modifications, l'ossature des chaînes énergétiques proposées par Gaidioz *et al.* (1998) est encore d'actualité. Nous y reviendrons dans le prochain chapitre, qui sera consacré à la description des phénomènes énergétiques par des chaînes énergétiques.

Enfin, comme toute approche par la modélisation, cette proposition d'enseignement entraîne une difficulté particulière : lors de l'utilisation d'un modèle, les élèves ont tendance à croire que les éléments du modèle (voire, leur représentation) sont une image de la réalité, comme le mettent particulièrement en évidence Morge et Doly (2013).

Concept scolaire d'énergie et enjeux de société

Dans cette section, nous distinguons deux concepts : d'une part, le concept scientifique scolaire d'énergie, qui est enseigné à travers les modèles scientifiques scolaires de l'énergie, et, d'autre part, le concept sociétal d'énergie⁴⁰, tel qu'il est présenté dans les débats de société (voir §3.1). Nous

39 Les réservoirs et les transformateurs (qui seront renommés « convertisseurs ») dont il est question ici ne sont pas équivalents aux réservoirs et transformations tels que définis en thermodynamique (§2.1), ou aux conversions d'énergie que l'on évoque en mécanique (§2.2).

40 Dans la continuité des définitions données au premier chapitre de ce manuscrit, il n'est pas totalement rigoureux de parler de « concept » scolaire d'énergie et de « concept » sociétal d'énergie ; il s'agirait plutôt de théorie scolaire de l'énergie et théorie sociétale de l'énergie, expressions qui demanderaient d'être éclaircies, que nous jugeons lourdes et superflues, c'est pourquoi nous choisissons de ne pas les utiliser.

rappelons que, bien que présentant des points communs, ces concepts ne sont *a priori* pas cohérents entre eux : dans la société, l'énergie est consommée, perdue, produite, payée, elle est associée à des objets et matériaux en particulier, alors qu'en sciences, elle se conserve, se dégrade et est attribuée à tout système.

Bien que cela n'ait jamais été prouvé – à notre connaissance –, il est légitime de penser que des expressions comme « pertes », « consommation » ou « production » d'énergie peuvent induire une mauvaise compréhension de la conservation de l'énergie chez les élèves, qui n'ont pas conscience de l'existence de deux concepts d'énergie différents (scientifique et sociétal). Dans un contexte de classe, ces deux concepts coexistent (Bächtold et Munier, 2014 ; Morge et Buty, 2014).

Constatant que le programme de 1^{re} S demande d'enseigner l'énergie en physique tout en apportant aux élèves une forme d'éducation citoyenne à l'énergie, Bächtold et Munier (2014) présentent les résultats d'une étude visant à déterminer dans quelle mesure les enseignants ont conscience du décalage entre le concept scolaire d'énergie et le concept sociétal d'énergie. Dans une étude préliminaire, ils avaient mis en évidence que les enseignants commencent majoritairement par enseigner le concept scolaire d'énergie, puis demandent à leurs élèves d'appliquer les connaissances acquises pour parler des enjeux sociétaux liés à l'énergie. Les résultats de cette étude mettent en évidence une rupture entre les deux approches du concept (sociétal et scientifique) pour les élèves, dont certains enseignants ne semblent pas avoir conscience, voire qu'ils partagent, ce qui est susceptible d'engendrer des confusions supplémentaires. Pour que ces deux concepts soient mis en relation correctement en classe, il faut donc penser à une articulation claire entre vocabulaire de la vie courante et vocabulaire scientifique.

Nous avons vu précédemment que, du point de vue de la physique, l'objectif principal de l'enseignement de l'énergie est une bonne maîtrise de son principe de conservation. Dans une optique de formation du citoyen aux enjeux sociétaux liés à la question de l'utilisation des ressources, il apparaît soit que l'objectif principal de l'enseignement de l'énergie se décale, soit qu'un second objectif se dégage : il ne s'agit plus uniquement d'une bonne maîtrise du principe de conservation de l'énergie (qui n'explique pas pourquoi il faut limiter l'utilisation des ressources), mais aussi d'une bonne maîtrise du principe de dégradation, qui permet de comprendre que toutes les formes d'énergie ne se valent pas. Cette question de la dégradation de l'énergie est donc fondamentale d'un point de vue sociétal, et est intimement liée aux confusions fréquentes entre les concepts d'énergie et d'entropie (voir par exemple Solomon [1985], qui propose d'enseigner d'abord la dégradation puis de prendre appui sur cette propriété afin d'aborder la conservation de l'énergie).

Rappelons que la dégradation est une propriété particulièrement mal comprise de l'énergie (Pintó, Couso et Gutierrez, 2005 ; Liu, Ebenezer et Frazer, 2002) et peu prise en considération dans les articles francophones de didactique de la physique relatifs à l'enseignement de l'énergie dans le secondaire (Vince et Tiberghien, 2012, 2015 ; Bental *et al.* 1995 ; Morge et Buty, 2014).

Propositions pour le supérieur

Dans les années 2000, plusieurs chercheurs ont proposé des pistes et des recommandations pour un meilleur enseignement de l'énergie dans le supérieur. Citons par exemple Brewe (2002), qui propose un enseignement scientifique ayant pour fil conducteur l'énergie, concept transversal en

physique. Dans cette approche, l'énergie est enseignée avant les forces et sert de point d'appui pour aborder la mécanique, ce qui est à l'opposé des pratiques traditionnelles (voir par exemple Warren, 1986). En particulier, le concept de travail est abordé *avant* celui de force, et non *en référence* à celui de force.

En 2007, Doménech et ses collègues dressent une liste de 24 propositions pour aboutir à un meilleur enseignement de l'énergie dans le supérieur, notamment relatives à une amélioration de la compréhension du sens de ce concept, de la conservation de l'énergie et de sa dégradation, en mettant en avant la nature systémique de l'énergie et en soulignant les liens qui doivent être faits entre science, technologie, société et environnement.

3.4. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons décrit l'ensemble des caractéristiques qui peuvent être utilisées pour parler d'énergie dans un contexte scolaire. Certaines sont consensuelles : il s'agit de la conservation de l'énergie, de la dégradation de l'énergie, du transfert d'énergie, et du caractère unificateur de l'énergie. Nous pouvons attribuer ces quatre caractéristiques à une sorte de « concept scolaire de l'énergie », auxquels se rattacheraient différents modèles scientifiques scolaires de l'énergie, susceptibles de les prendre en charge ou non, mais se devant de ne pas les mettre en défaut.

Depuis les années 1970, de nombreuses études ont mis en évidence les difficultés de compréhension et d'appropriation du concept d'énergie par les élèves, mais aussi par les enseignants. Elles concernent la nature de l'énergie, qui est souvent confondue avec d'autres grandeurs et n'est pas toujours perçue comme unificatrice. Elles concernent également les propriétés de l'énergie, et, en particulier, sa conservation et sa dégradation. L'articulation entre le concept scientifique scolaire d'énergie et le concept sociétal d'énergie, indispensable pour une bonne compréhension des enjeux sociétaux liés à l'énergie, a donné lieu à quelques recherches ; les résultats indiquent une prise en charge partielle de cette problématique dans l'enseignement en France.

Si le concept scolaire d'énergie est un objet particulièrement difficile à enseigner, de nombreuses pistes ont été proposées pour améliorer son enseignement et prendre en charge les difficultés liées à son apprentissage, qui se doit d'être progressif et de commencer par une approche qualitative aboutissant à une quantification des échanges d'énergie entre systèmes. En particulier, des modèles scientifiques scolaires initiaux de l'énergie mettant en jeu des représentations de type « chaîne énergétique » ont été élaborés et promus par la didactique bien qu'ils n'aient, à notre connaissance, pas fait l'objet d'une évaluation scientifique visant à déterminer leurs effets sur les apprentissages⁴¹.

41 Bien que la question de l'efficacité de ces modèles soit intéressante, elle ne sera pas abordée dans ce travail de thèse, qui porte sur la mise en évidence de différents modèles scientifiques scolaires de l'énergie pour le Cycle 4.

4. Les chaînes énergétiques : une représentation pour les phénomènes énergétiques

Lorsque nous avons demandé aux enseignants que nous avons interrogés (voir Introduction, *Entretiens exploratoires*) de tracer des chaînes énergétiques (sans préciser ce que nous entendions par « chaîne énergétique »), chacun d'entre eux nous a proposé spontanément des schémas. Pour représenter une même situation (une lampe de poche allumée), les cinq schémas tracés étaient très différents les uns des autres : ils ne comportent ni le même nombre de figures géométriques (de 1 à 4 selon les représentations), ni le même type de flèches (épaisses ou non, dont la flèche figure au milieu ou à l'extrémité du segment), ni les mêmes indications (sur les flèches ou à proximité des autres éléments).

Pourtant, lorsqu'il est question de chaîne énergétique en didactique, il est rarement fait mention d'une multiplicité de représentations possibles, tant dans l'aspect visuel de la chaîne (quelles formes pour quelles fonctions, systèmes ou objets représentés ?) que dans le sens qui lui est donné (quelles sont les fonctions, systèmes et objets à représenter, et selon quelles règles ?)

Pour pouvoir analyser des chaînes énergétiques, nous commençons par recenser celles qui ont été proposées par des chercheurs en didactique de la physique ainsi que celles qui sont souvent référencées par ces chercheurs. Nous nous intéresserons en particulier à un type de chaînes énergétiques, largement documenté par un collectif de chercheurs français qui ont proposé un modèle scientifique scolaire pour l'enseignement de l'énergie en classe de 1^{re} S (Gaidioz *et al.*, 1998).

Nous mettrons en évidence que si les chaînes énergétiques peuvent entretenir certaines difficultés chez les élèves (en particulier, le raisonnement linéaire causal et la substantialisation de l'énergie), elles restent considérées comme pertinentes (voire nécessaires) pour la construction d'un premier modèle scientifique scolaire de l'énergie par la communauté de recherche en didactique.

4.1. Définition et généralités

Nous avons choisi de définir les chaînes énergétiques de la façon suivante :

Une chaîne énergétique (ou « chaîne d'énergie ») **est une représentation schématique qui met en évidence, en particulier par l'utilisation de flèches, *a minima* un ou plusieurs transferts et/ou flux d'énergie entre des systèmes et/ou un ou plusieurs changements de forme d'énergie au sein d'un système ou entre plusieurs systèmes**⁴².

Cette définition nous a semblé suffisamment précise pour se limiter aux représentations spécifiquement associées aux phénomènes énergétiques, mais aussi suffisamment large pour englober un grand nombre de représentations, applicables à de multiples domaines (mécanique, électrocinétique, biologie, etc.) En effet, la chaîne énergétique est un objet pensé pour mettre en relation les différents domaines scientifiques (Bruguière *et al.*, 2002), déjà proposé pour l'enseignement de sciences physiques dans un contexte pluridisciplinaire en 1986 (Darot, 1986).

42 Bien qu'elle fasse appel à la notion de système, nous n'excluons pas de cette définition les représentations dans lesquelles les systèmes ne seraient pas clairement définis.

En imposant que les chaînes énergétiques représentent *a minima* un transfert, une transformation ou une modification de l'énergie, nous faisons le choix de nous focaliser sur des représentations dans lesquelles l'énergie est considérée comme un concept qui a une forte dimension *scientifique*. Certaines représentations, appelées par leurs auteurs *chaînes énergétiques* mais ne correspondant pas à cette définition, seront donc écartées de notre étude, comme celles proposées par Koliopoulos et Argyropoulou (2011, p.71) (Figure 7) ou par Boyer et Givry (2016, p.213 et suivantes) (Figure 8).

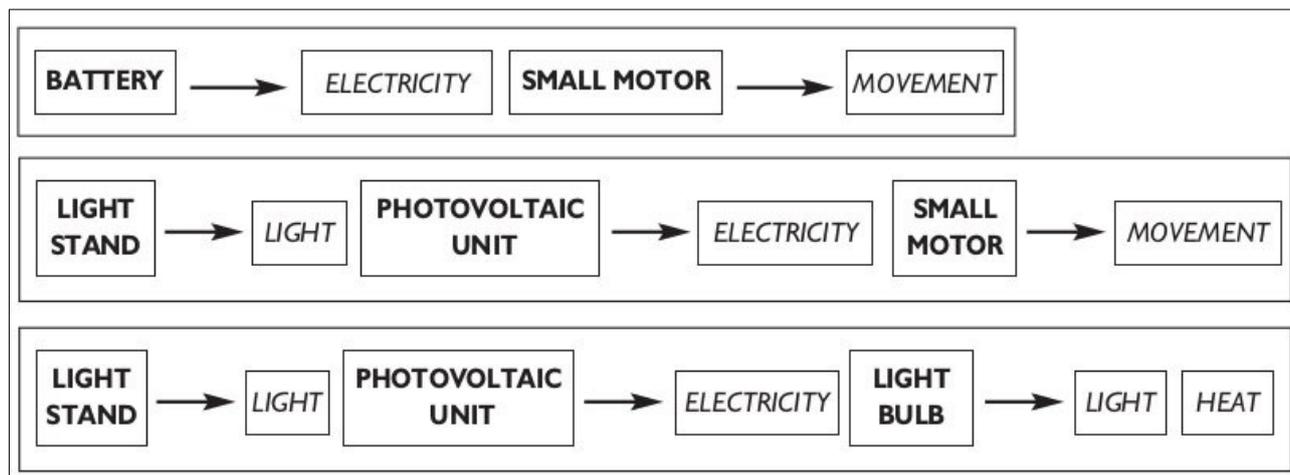


Figure 7 : « chaînes énergétiques » proposées par Koliopoulos et Argyropoulou (2011, p.71)

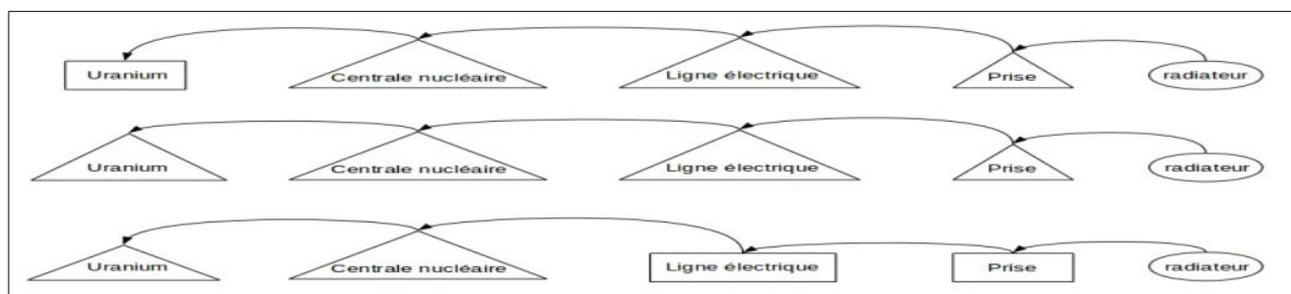


Figure 8 : « chaînes énergétiques » proposées par Boyer et Givry (2016, p.216)

Les flèches qui figurent sur les représentations proposées par Koliopoulos et Argyropoulou (2011) n'ont pas un sens clair, mais il apparaît qu'elles n'indiquent ni un transfert d'énergie (ils figurent en italique dans certains rectangles), ni une transformation ou une modification d'énergie (les formes d'énergie n'apparaissent nulle part). Les flèches qui figurent sur les représentations proposées par Boyer et Givry (2016) représentent la provenance de l'énergie – et, de ce fait, ni un transfert ou un flux, ni une transformation, ni une modification de l'énergie. Selon les auteurs, ces chaînes ont « pour objectif de permettre aux élèves de remonter aux sources d'énergie dites « primaires » en partant soit d'objets qui éclairent, chauffent où se déplacent ; soit de centrale électrique » (Boyer et Givry, 2016, p.212).

Les chaînes énergétiques sont des représentations étroitement liées au contexte scolaire, comme le soulignent Vince et Tiberghien, (2015, p.1105). À ce sujet, Gaidioz *et al.* (1998) précisent :

« Tout d'abord nous affirmons clairement que pour des physiciens cette représentation est inutile. C'est une création didactique, comme il en existe ailleurs (la célèbre table à coussin d'air par exemple), faite pour aider à l'apprentissage des concepts. Cette représentation vient de la nécessité, aussi bien en physique que dans d'autres domaines scientifiques, d'un support graphique : les schémas électriques et les représentations vectorielles d'une situation avec des forces par exemple. Or, représenter l'énergie au niveau qualitatif, rien qu'avec des mots, semble tout à fait insuffisant pour plusieurs raisons : les mots comme énergie ont des sens différents pour les élèves et pour le professeur, même s'il y a un recouvrement ; la représentation de la chaîne énergétique n'est pas strictement équivalente aux mots, comme toute représentation graphique. Dans ce cas précis, elle oblige à structurer une situation expérimentale en systèmes (même si au départ ce n'est pas dit explicitement par le professeur) représentés par des rectangles et à représenter l'interaction par des flèches. Cet aspect est crucial, et très difficile comme le montrent en particulier les travaux sur l'enseignement de la mécanique, et ne peut qu'être difficilement explicité avec des mots ou des formules mathématiques. » (Gaidioz *et al.*, 1998, p.154)

Il est donc normal (dans le sens : attendu) qu'on ne trouve pas de référence directe à ces chaînes dans le savoir savant scientifique, ni dans l'enseignement supérieur (chap.2). Pour illustrer cela, remarquons que Brewe (2002), dans sa thèse de doctorat qui porte sur l'enseignement de l'énergie dans le supérieur, mentionne une grande diversité de représentations pour les phénomènes énergétiques, mais n'évoque jamais les chaînes énergétiques.

Au-delà de son aspect visuel, une chaîne est une représentation qui s'appuie sur un modèle scolaire de l'énergie et qui en illustre certains aspects : elle représente certains éléments du modèle dont elle est issue, dont certaines caractéristiques de l'énergie et certaines règles de modélisation spécifiques au modèle. En tant que représentation associée à un modèle, elle comporte des approximations ainsi que des limites soit propres à la représentation, soit qu'elle partage avec le modèle.

Par ailleurs, un même type de chaînes énergétiques peut être en adéquation avec plusieurs modèles scolaires différents de l'énergie – il suffit pour cela que les différences entre ces modèles ne soient pas évoquées à travers les chaînes. De la même manière, il est possible d'utiliser plusieurs chaînes différentes pour illustrer un même modèle de l'énergie, chacune d'entre elles s'intéressant à un aspect particulier du modèle. En d'autres termes, il n'y a *a priori* pas de correspondance unique entre un modèle scientifique scolaire de l'énergie et un type de chaînes énergétiques.

Dans le paragraphe suivant, nous allons décrire les types de chaînes énergétiques les plus couramment rencontrés en didactique de la physique.

4.2. Les différentes catégories de chaînes énergétiques

Selon notre définition, les chaînes énergétiques représentent *a minima* un transfert d'énergie, une transformation d'énergie ou une modification d'énergie. Un transfert d'énergie a lieu pendant un événement : il peut être relié à un instantané de la situation. Par contre, une transformation ou une modification d'énergie prend tout son sens lorsqu'on s'intéresse à l'évolution de l'énergie (forme et/ou valeur) d'un ou de plusieurs systèmes au cours du temps.

De ce fait, nous pouvons distinguer deux catégories de chaînes énergétiques : les chaînes *pendant*⁴³, qui représentent un phénomène énergétique à un moment donné, et les chaînes *avant-après*⁴³, qui représentent une évolution énergétique au cours du temps. Dans cette section, nous décrivons ces deux catégories de chaînes.

À notre connaissance, Lemeignan et Weil-Barais (1992, 1993) ont été les premiers à présenter et à décrire des chaînes de type *pendant* et *avant-après*. Par la suite, elles ont été largement documentées dans l'ouvrage écrit par un collectif de chercheurs et enseignants de l'équipe COAST (Gaidioz *et al.*, 1998), en étant associées à un modèle scientifique scolaire de l'énergie – que nous avons évoqué dans le chapitre précédent – dont elles illustrent différents aspects. Nous reviendrons sur ces propositions didactiques particulières par la suite.

Les chaînes *pendant*

Les chaînes *pendant* représentent un phénomène énergétique à un instant précis : elles mettent donc le plus souvent en évidence en particulier un ou plusieurs transferts (ou flux) d'énergie. Il peut s'agir de représenter un transfert d'énergie entre deux systèmes – les systèmes mis en jeu sont alors représentés sur la chaîne – ou un transfert d'énergie entrant ou sortant – seul le système qui reçoit ou qui émet le transfert étant représenté, comme illustré par la Figure 9.

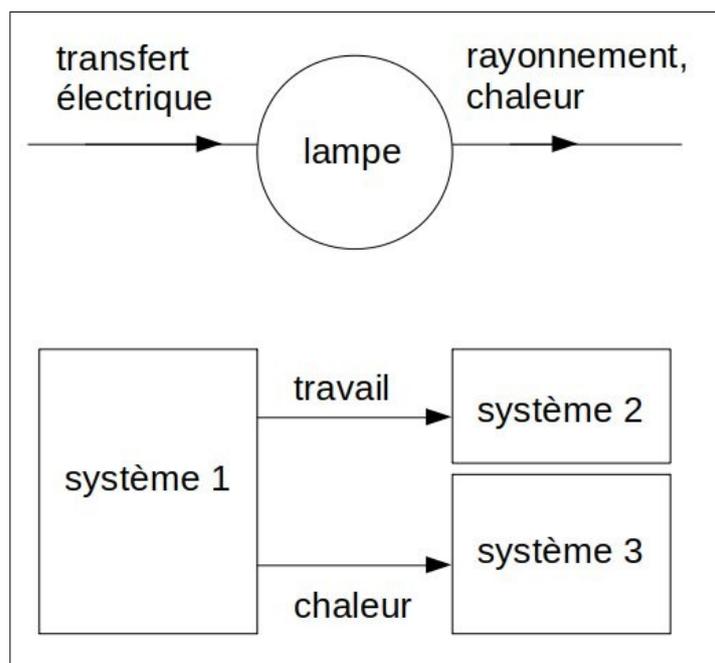


Figure 9: exemples de chaînes pendant

Sur ces chaînes, il est *a priori* difficile⁴⁴ de représenter rigoureusement les caractéristiques de l'énergie liées à l'évolution temporelle d'une situation : la *transformation*, la *modification*, et la *conservation* de l'énergie.

43 Nous reprenons la dénomination proposée par Lemeignan et Weil-Barais (1992, 1993), Gaidioz *et al.* (1998), Bécu-Robinault (1997).

44 Ces représentations sont possibles, mais elles nécessitent de faire figurer des sens de variation à un instant donné, ce qui est considéré comme difficile, voire entravant les apprentissages, notamment dans le secondaire (Gaidioz *et al.*, 1998).

Les chaînes *avant-après*

Les chaînes *avant-après* représentent l'évolution d'un phénomène énergétique au cours du temps : elles mettent donc en évidence une ou plusieurs modifications et/ou une ou plusieurs transformations de l'énergie, comme l'illustrent les Figure 10 et Figure 11.

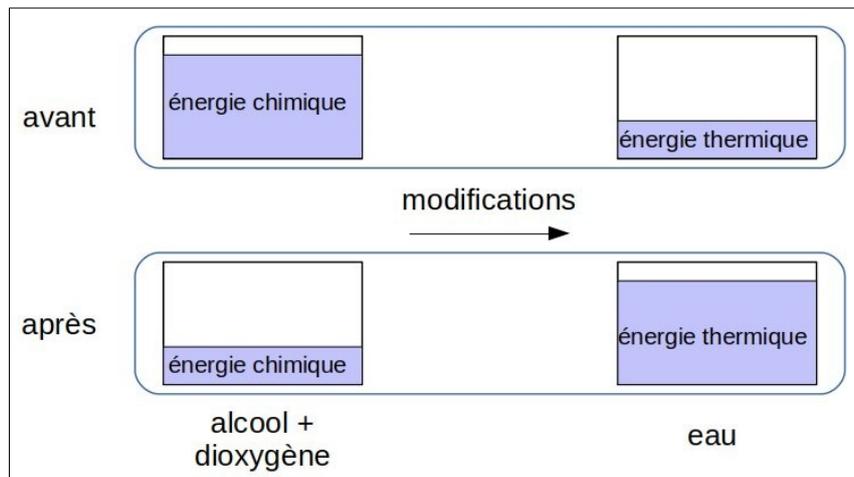


Figure 10: exemple de chaîne avant-après (modifications)

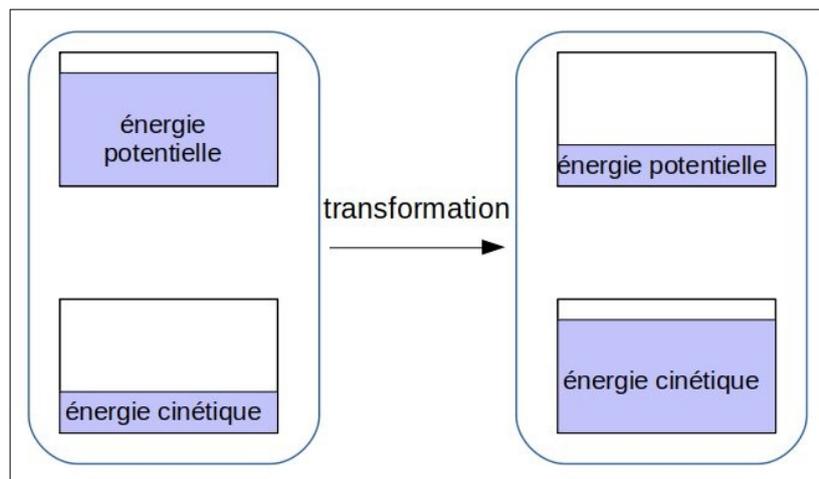


Figure 11: exemple de chaîne avant-après (transformation)

4.3. Différents types de chaînes – revue bibliographique des propositions didactiques

Dans la section précédente, nous avons mis en évidence la possibilité de représenter deux types de chaînes distincts : les chaînes qui représentent un instantané, dont les flèches ne sont pas des flèches du temps, et les chaînes qui représentent l'évolution temporelle d'une situation.

À présent, nous allons passer en revue et décrire les méthodes qui ont été proposées en didactique pour le tracé de certaines chaînes énergétiques, en particulier par Lemeignan et Weil-

Barais (1992, 1993) et par Gaidioz et ses coauteurs (1998), qui proposent des modèles scientifiques scolaires de l'énergie. Ces méthodologies ont été reprises et modifiées par d'autres auteurs, dont nous exposerons les choix de chaînes énergétiques.

Chaînes proposées par Lemeignan et Weil-Barais (1992, 1993)

Dans leur ouvrage *Construire des concepts en Physique* paru en 1993, Lemeignan et Weil-Barais proposent et décrivent un modèle scientifique scolaire de l'énergie auquel ils associent plusieurs types de chaînes – les chaînes d'objets, les chaînes de fonction, et les chaînes de distribution –, avant d'aborder les chaînes énergétiques à proprement parler. Les chaînes d'objets et de fonction ont pour objectif la mise en place des chaînes de distribution. Pour les construire, on commence par s'interroger « sur la possibilité de réaliser un événement non réalisable de manière immédiate (par exemple, allumer une lampe, faire rouler une voiture) » (Lemeignan et Weil-Barais, 1993, p.67), en traçant une chaîne de *fonction*. Les chaînes de *distribution* sont une représentation « structurelle » de la situation. Les auteurs leur ajoutent un formalisme lié aux savoirs scolaires relatifs à l'énergie : les différents transferts sont précisés (travail mécanique, travail électrique, chaleur, rayonnement), tout comme les différentes formes d'énergie susceptibles d'évoluer pendant la situation (énergie cinétique, énergie de niveau, énergie chimique, énergie nucléaire, énergie de température). La Figure 12 montre la chaîne *fonction*, la chaîne *distribution*, puis la chaîne *énergétique* associées à une même situation expérimentale (Lemeignan et Weil-Barais, 1990, dans Lemeignan et Weil-Barais, 1994, p.105).

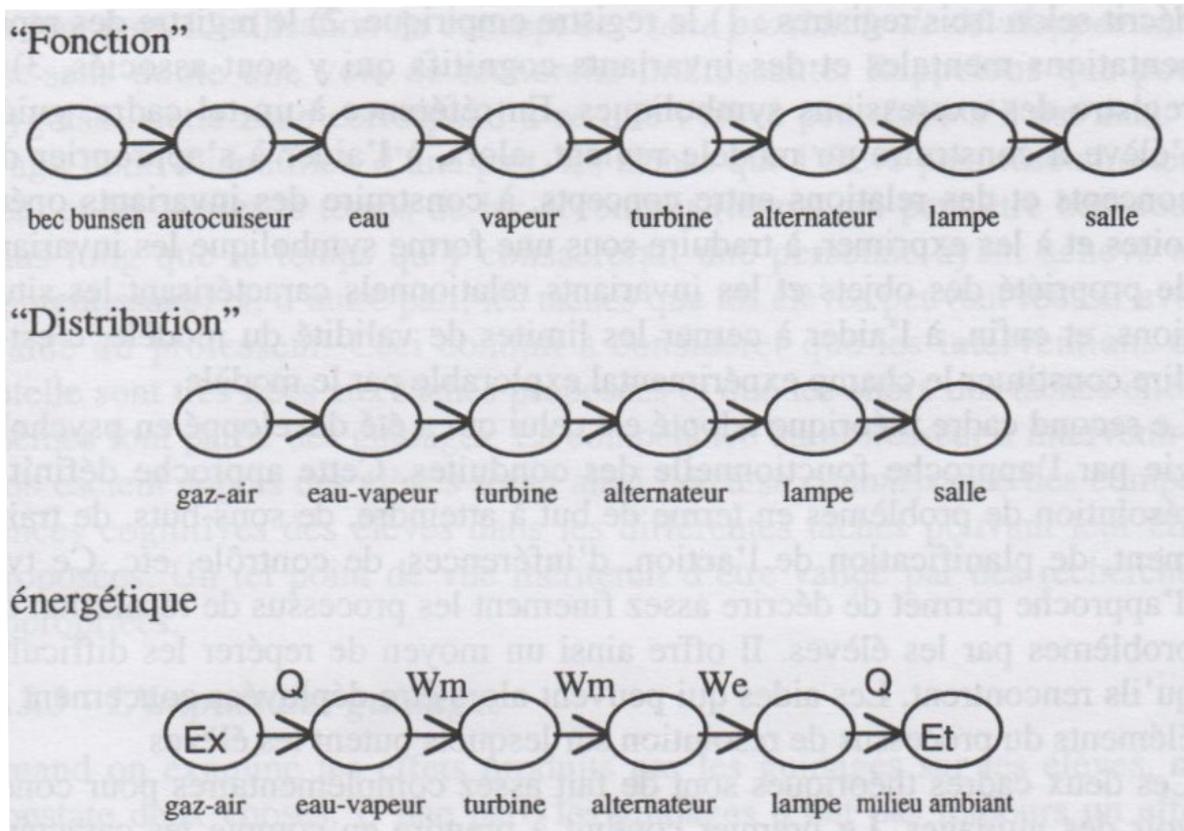


Figure 12: représentations "fonction", "distribution" et "énergétique" d'une situation expérimentale (Lemeignan et Weil-Barais, 1990, dans Lemeignan et Weil-Barais, 1994, p.105)

Les auteurs discutent ensuite du principe de dégradation de l'énergie : au cours de tout événement, « l'énergie perd de sa qualité », puisque toute l'énergie transférée à un système par travail ne peut pas intégralement donner lieu à un travail « sortant » (Lemeignan et Weil-Barais, 1993, p.174). Un réservoir « poubelle » est ajouté en bout de chaîne : il s'agit de l'air ambiant, dont l'énergie « de température » augmente. Il se distingue des autres par sa couleur (patatoïde gris). Tous les transferts ayant pour conséquence une dégradation de l'énergie, les flèches de transfert qui figurent sur la chaîne et les systèmes mis en jeu sont reliées au réservoir *poubelle* (voir Figure 13).

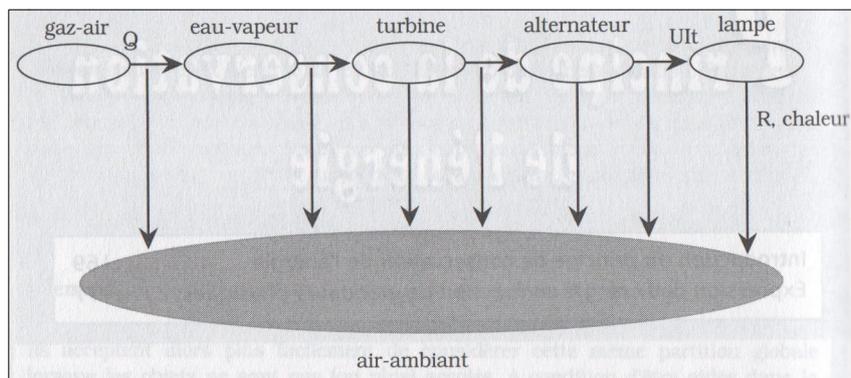


Figure 13 : chaîne mettant en évidence la dégradation de l'énergie (Lemeignan et Weil-Barais, 1993, p.170)

Selon leurs auteurs, ces chaînes énergétiques permettent de mettre en évidence l'utilisation de l'énergie dans un but précis, comme par exemple allumer une lampe. Dans ce genre de situations, l'énergie associée à un transfert qui permet l'allumage est qualifiée d'« utile » (notée E_u) tandis que celle qui va donner lieu à un transfert par chaleur sans rapport avec l'allumage de la lampe est qualifiée d'« inutile » (notée E_{inu}) (voir Figure 14). L'énergie qu'avait reçue le système considéré est appelée « énergie d'entrée » et notée E_e . Ces notations permettent d'établir des rendements énergétiques, et leur visualisation sur les chaînes permet aux élèves de proposer des modifications du montage afin d'améliorer le rendement du dispositif (Lemeignan et Weil-Barais, 1993, p.170-172).

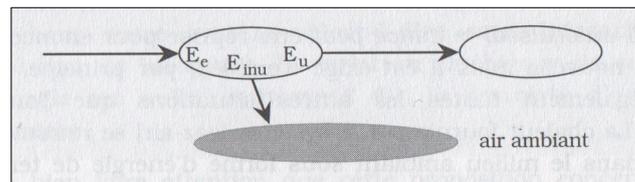


Figure 14 : chaîne mettant en évidence la distinction entre énergie utile et énergie inutile (Lemeignan et Weil-Barais, 1993, p.171)

Lemeignan et Weil-Barais (1993) soulignent que les chaînes énergétiques qu'ils proposent ne permettent pas de répondre à des questions relatives à la quantification des transferts d'énergie. Ils reprennent l'exemple de l'allumage d'une lampe à l'aide d'un autocuiseur (Figure 12), et posent, entre autres, les questions suivantes :

« entre le début et la fin de l'expérience dans cette situation *autocuiseur* → *lampe*, c'est-à-dire entre le début de l'allumage et l'extinction de la lampe, l'énergie chimique du système [gaz-air] fournie à la chaîne, compte tenu des énergies inutilisées, se retrouve dans l'air ambiant. Mais se retrouve-t-elle intégralement ou seulement en partie dans cette *poubelle* énergétique pour contribuer à élever sa température ? Autrement dit, la température de l'air ambiant serait-elle la même si, au lieu d'allumer une lampe, on s'était contenté de faire fonctionner le brûleur à gaz et de chauffer l'air ambiant pendant le même temps que celui de l'allumage de la lampe ? Là encore, pas de réponse en fonction des propositions antérieures. » (Lemeignan et Weil-Barais, 1993, p.171)

Une étude quantitative de la situation implique une connaissance du principe de conservation de l'énergie, que les chaînes vues jusqu'à présent ne mettent pas en évidence.

Les auteurs développent alors un autre type de représentation : une chaîne dite « avant-pendant-après » (de type *avant-après*), qui permet de montrer la conservation de l'énergie. Dans un premier temps, ils proposent une représentation qui « concerne une chaîne simplifiée sans tenir compte des énergies non utilisées » (Figure 15), et ajoutent que « dans une représentation plus complète il faudrait tenir compte (...) de tous les transferts entrant et sortant de chaque système » (Lemeignan et Weil-Barais, 1993, p.172).

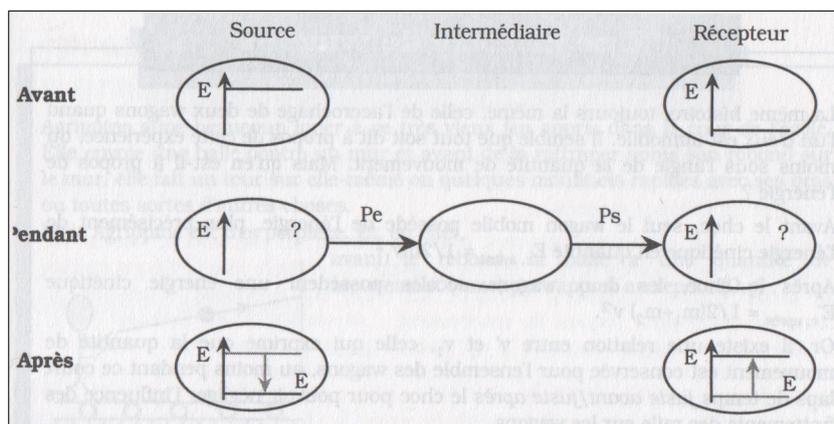


Figure 15 : exemple de chaîne avant-pendant-après (Lemeignan et Weil-Barais, 1993, p.173)

Chaînes proposées par l'équipe COAST (Gaidioz *et al.*, 1998)

Dans cette partie, nous allons décrire des chaînes qui ont été largement documentées dans un ouvrage écrit par un collectif de chercheurs en didactique de la physique et d'enseignants de l'équipe COAST (Gaidioz *et al.*, 1998).

Comme Lemeignan et Weil-Barais (1993, 1992), cette équipe propose l'utilisation de chaînes *pendant* et de chaînes *avant-après*⁴⁵, cependant leurs approches diffèrent dans le sens où les chaînes COAST ne sont pas spécifiquement associées à des dispositifs techniques. Elles peuvent représenter un très grand nombre de situations, qu'elles soient « naturelles » ou « technologiques ».

Les chaînes *pendant* ont été proposées en particulier en France et/ou par des chercheurs français dans les années 1990 (Gaidioz *et al.*, 1998 ; Bécu-Robinault, 1997 ; Bental *et al.*, 1995 ; Devi *et al.*, 1996 ; El Hajjami *et al.*, 1999), mais elles ne semblent pas avoir eu d'impact notable en didactique en dehors de nos frontières⁴⁶.

Les chaînes *pendant*

Les règles qui régissent l'élaboration des chaînes *pendant* sont présentées dans un document à destination d'élèves (Gaidioz *et al.*, 1998, p.19 : « Fiche-élève n°3 – activité introductive à la conservation de l'énergie : modèle énergétique »), en regard des caractéristiques de l'énergie qu'elles permettent de représenter (Figure 16).

45 Nous rappelons que nous avons repris cette double dénomination en référence à leurs travaux. Dans cette partie, sauf mention contraire, les expressions « chaîne pendant » et « chaîne avant-après » ne sont pas à prendre dans un sens générique, mais désignent les chaînes spécifiquement proposées par Gaidioz *et al.* (1998).

46 On remarque que Millar (2005, p.15) utilise une représentation semblable à celle proposée par l'équipe COAST (chaîne « pendant »), mais sans y faire référence (Figure 23).

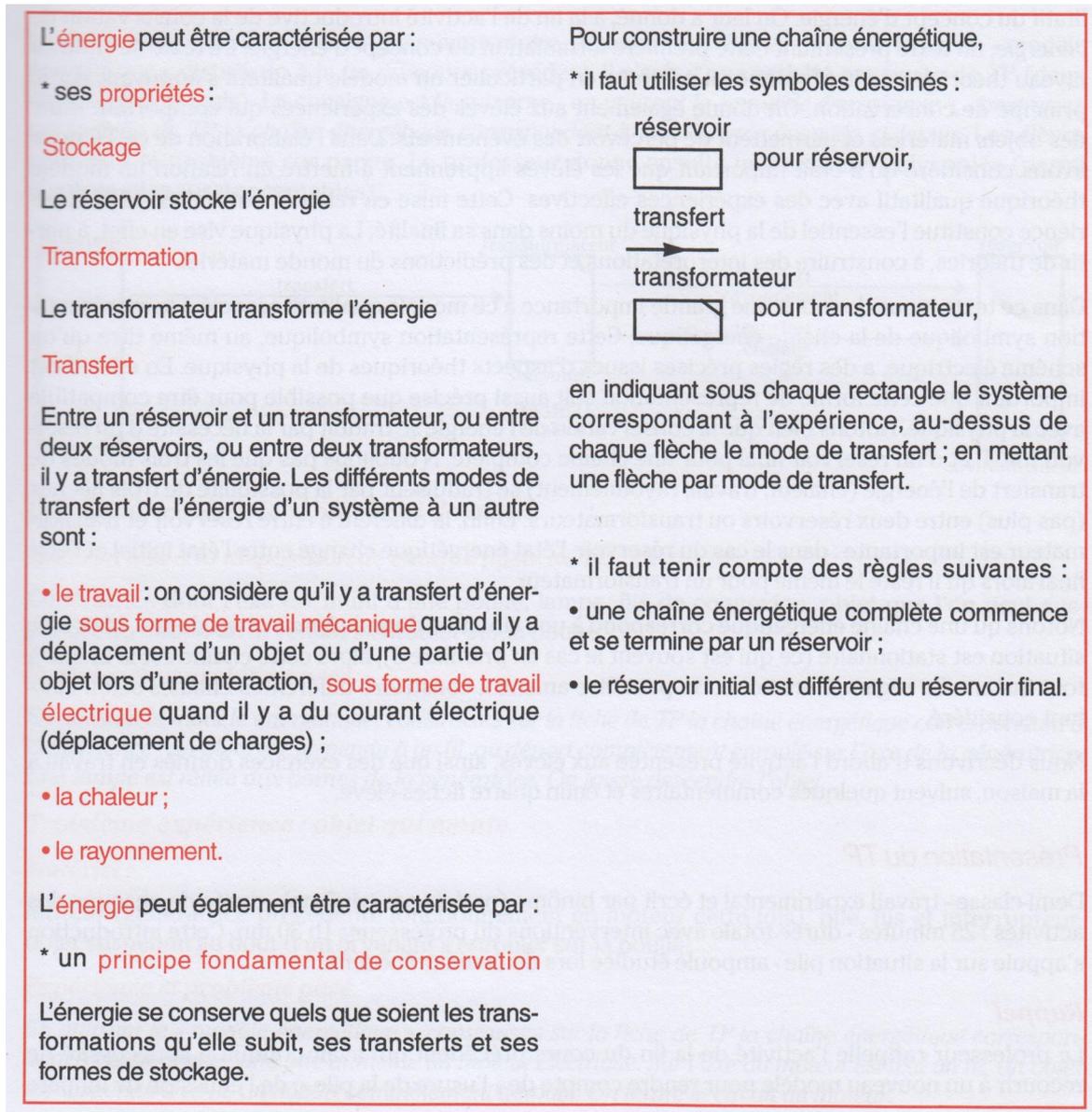


Figure 16 : « Modèle énergétique » et règles de construction des chaînes pendant de l'équipe COAST (Gaidioz et al., 1998, p.19)

D'après la Figure 16, les chaînes énergétiques sont associées à un modèle scolaire de l'énergie dans lequel elle est caractérisée par trois propriétés : stockage, conversion⁴⁷ et transfert, et un principe : la conservation de l'énergie.

Deux types de systèmes sont associés à ces propriétés : celui de « réservoir », défini par « le réservoir stocke de l'énergie », représenté par un rectangle au-dessus duquel est inscrit « réservoir » et en-dessous duquel doit être inscrit le nom du réservoir, et celui de « transformateur », défini par

⁴⁷ Les personnes que nous citons utilisent le terme « transformation » pour désigner une conversion. Comme vu précédemment (§3.1), les auteurs qui se réfèrent à ce modèle scolaire de l'énergie et aux chaînes *pendant* qui lui sont associées privilégieront par la suite le mot « conversion ». Par souci de clarté, nous n'utiliserons que le mot « conversion » pour faire référence à cette caractéristique de l'énergie.

« un transformateur transforme l'énergie », représenté par un rectangle à encoche au-dessus duquel est inscrit « transformateur » et en-dessous duquel doit être inscrit le nom du transformateur. Notons que les auteurs proposent plus loin une distinction plus claire entre réservoirs et transformateurs : « dans le cas du réservoir, l'état énergétique change entre l'état initial et l'état final alors qu'il reste le même pour un transformateur » (Gaidioz *et al.*, 1998, p.20).

Il est aussi précisé qu'« une chaîne énergétique complète « commence par un réservoir et se termine par un réservoir » et que « le réservoir initial est différent du réservoir final ». Nous n'avons pas trouvé de justification pour cette dernière règle, qui rend impossible la représentation d'une rétroaction sur le système de départ.

Les transferts qui ont lieu entre les systèmes sont représentés par des flèches, au-dessus desquelles est inscrit « transfert » et en-dessous desquelles sont indiqués les noms des transferts (travail électrique, travail mécanique, rayonnement, chaleur). Comme l'illustre la Figure 17, sur ces flèches, peuvent apparaître des valeurs de puissance – on ne note alors plus le mot « transfert » dessus (Gaidioz *et al.*, 1998, p.68).

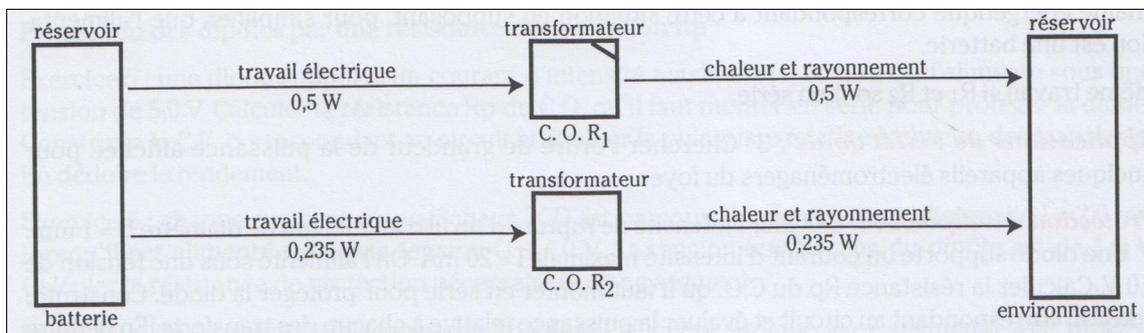


Figure 17 : chaîne pendant avec valeurs de puissance (Gaidioz *et al.*, 1998, p.68)

Ces chaînes permettent de représenter un grand nombre de situations, mais ne sont toutefois pas toujours pertinentes, comme le soulignent les auteurs :

« Notons que cette représentation n'est pas intéressante pour des transformations internes à un seul domaine comme souvent la mécanique ou la chimie où, stockage, [conversion] et transferts se font dans un même lieu, voire un même système (au sens large) (solution chimique, pendule,...) à l'intérieur duquel l'énergie est transformée. » (Gaidioz *et al.*, 1998, p.155)

Les chaînes état initial – état final

Les chaînes *état initial – état final* montrent une évolution des systèmes énergétiques au cours du temps. Elles sont décrites après les chaînes *pendant*, qui sont un prérequis nécessaire à leur compréhension et à leur élaboration (Gaidioz *et al.*, 1998, p.29, p.35), et s'appuient sur le principe de conservation de l'énergie, qu'elles illustrent.

Pour les construire, on représente l'ensemble des systèmes d'une chaîne *pendant* (autant les réservoirs que les transformateurs) par des rectangles (avec une encoche, dans le cas de transformateurs) dans lesquels figurent les « niveaux d'énergie » avant et après que le phénomène a eu lieu.

Comme l'illustre la Figure 18 (Gaidioz *et al.*, 1998, p.30), deux types de représentations sont proposés pour montrer le changement du niveau d'énergie du réservoir : soit en représentant deux fois le réservoir, une barre horizontale figurant son niveau d'énergie, soit en représentant deux barres horizontales sur un même réservoir, une flèche partant du niveau d'énergie initial et atteignant le niveau d'énergie final. Les barres horizontales qui représentent le niveau initial d'énergie sont tracées en pointillées.

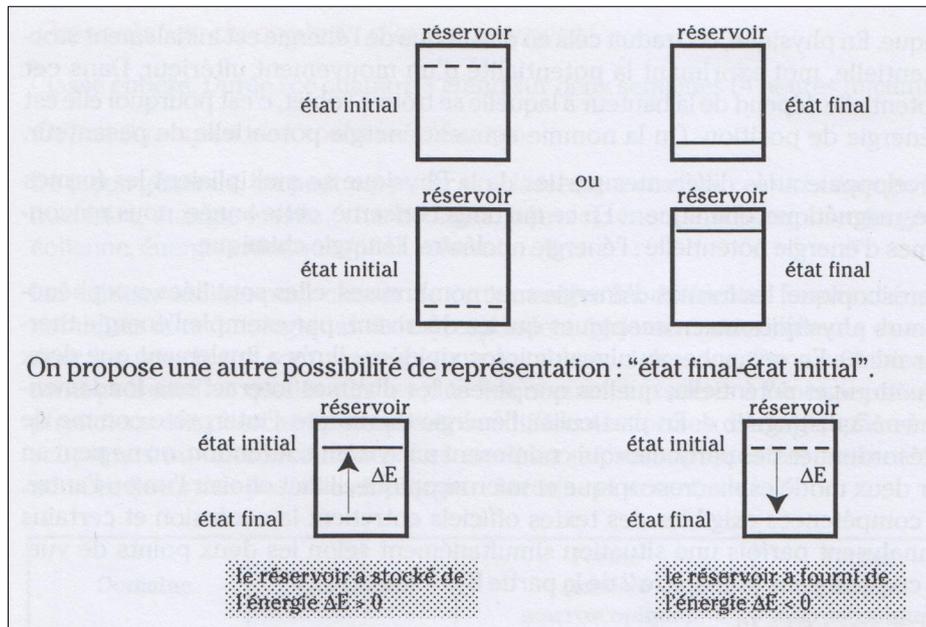


Figure 18 : différentes représentations des états énergétiques initiaux et finaux pour les réservoirs (Gaidioz *et al.*, 1998, p.30) ; on constate une inversion concernant la dénomination des états initial et final du réservoir représenté en bas à droite de la figure

On obtient alors des chaînes doubles : une chaîne *pendant*, qui illustre les transferts d'énergie, en-dessous de laquelle se trouve une chaîne *état initial – état final*, qui illustre la conservation de l'énergie (Figure 19).

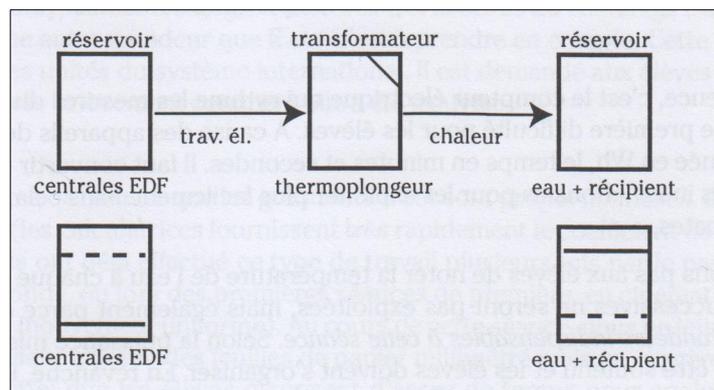


Figure 19 : chaîne pendant et chaîne état initial - état final correspondante (Gaidioz *et al.*, 1998, p.41)

Les chaînes *état initial – état final* permettent également une représentation des situations pour lesquelles les chaînes *pendant* ne sont pas jugées pertinentes, comme la chute d'une balle (Figure 20) ou l'usure d'une pile (Figure 21). Les différentes formes d'énergie contenues dans les réservoirs et dont la quantité varie au cours du temps sont représentées différemment les unes des autres.

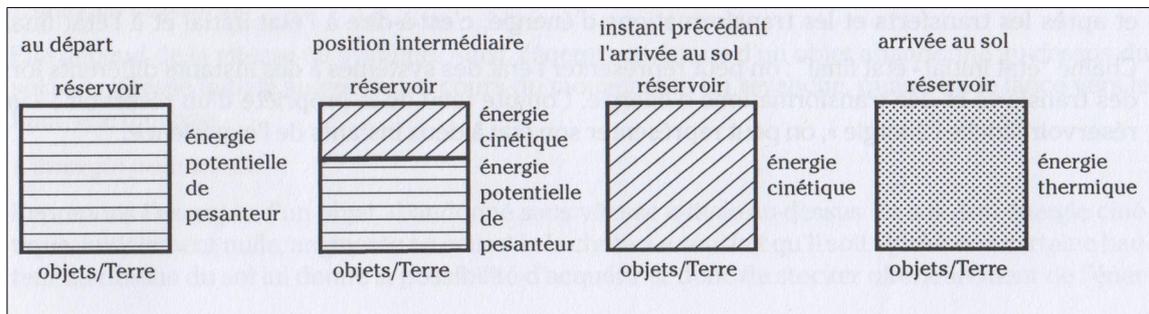


Figure 20 : chaîne état initial - état final illustrant la chute d'un objet (Gaidioz et al., 1998, p.30)

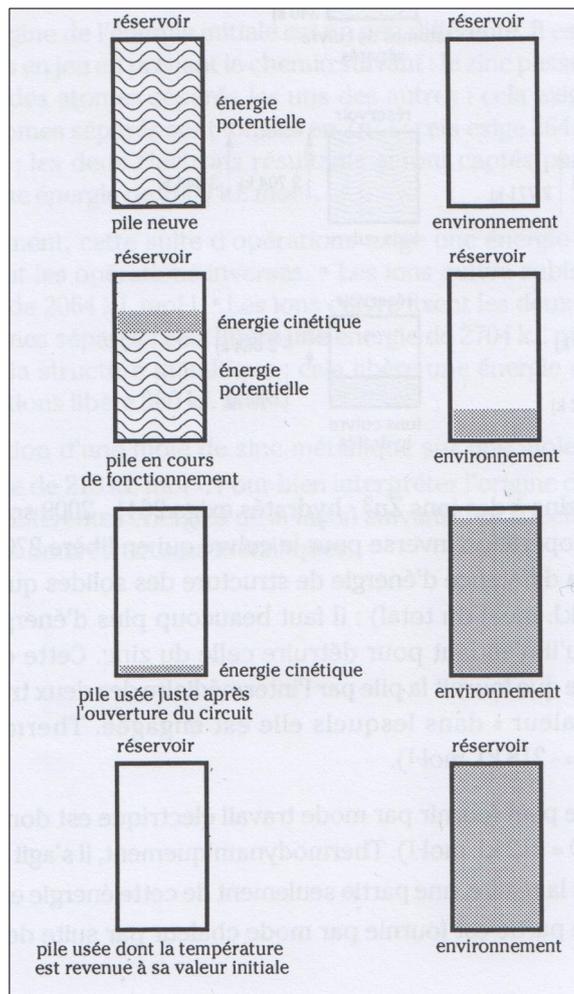


Figure 21 : chaîne état initial - état final illustrant l'usure d'une pile (Gaidioz et al., 1998, p.116)

Variantes des chaînes COAST

Dès les années 1990, les chaînes COAST connaissent un certain succès en France, où elles sont reprises dans de nombreux articles – en particulier, les chaînes *pendant*, associées à leur tableau descriptif (Figure 16). Nous allons évoquer ici certaines de ces reprises, en mettant en évidence les variations qui existent entre ces représentations.

Avant tout, soulignons une différence d'approche majeure : alors que Gaidioz et al (1998) proposaient une double représentation composée d'une chaîne *pendant* à laquelle était associée une chaîne *avant-après*, qui permettait de mettre en évidence la conservation de l'énergie, la plupart des auteurs qui ont repris les chaînes *pendant* de COAST ont laissé de côté les chaînes *avant-après*, que nous n'avons retrouvées que dans la thèse de Bécu-Robinault (1997), soutenue avant la parution de l'ouvrage de Gaidioz et al. (1998), et dans un article de Ducourant (2019).

Variantes de chaînes pendant

Les chaînes *pendant* que présente l'équipe COAST (Gaidioz *et al.*, 1998) figurent dans un grand nombre de productions en didactique de la physique⁴⁸. Les règles qui régissent l'élaboration de ces chaînes sont souvent reprises à l'identique de celles que nous avons reproduites à la Figure 16 ; on les trouve dans de nombreux articles ou thèse, parfois antérieurs à l'ouvrage de Gaidioz *et al.* (1998) : citons par exemple la thèse de Bécu-Robinault (1997) et les articles de Bental *et al.* (1995), Devi *et al.*, (1996), El Hajjami *et al.* (1999), Megalakaki et Tiberghien (2011). Plus récemment, ce type de représentation a été à nouveau mis en avant et promu pour l'enseignement (Vince et Tiberghien, 2015 ; Morge et Buty, 2014 ; Ducourant, 2019).

Ces chaînes sont légèrement différentes de celles présentées par Gaidioz *et al.* (2018).

D'une part, les systèmes que Gaidioz *et al.* (1998) appelaient *transformateurs* ont progressivement été renommés *convertisseurs*. On note deux raisons majeures à cela : d'une part, le mot « transformateur » évoque un changement de forme (or ce type de système ne permet pas un changement de forme de l'énergie, mais un changement de mode de transfert), d'autre part, il peut être confondu avec le dispositif électrique qui permet de modifier des tensions ou des courants électriques (Bécu-Robinault, communication personnelle, 3 janvier 2022, confirmé par Vince et Tiberghien [2012] et Ducourant [2019]). Cependant, ce changement de terme n'a pas eu lieu de façon homogène, et on trouve encore des écrits mentionnant les « transformateurs d'énergie » (par exemple : Boyer et Givry, 2016 ; Morge et Buty, 2014). Pour des raisons de clarté, de cohérence et de simplicité, nous appellerons ces systèmes « convertisseurs » dans la suite de notre travail.

D'autre part, la manière de symboliser les convertisseurs a changé : initialement représentés par un rectangle avec encoche, ils le sont à présent le plus souvent par une ellipse ou un cercle (voir par exemple : Boyer et Givry, 2016 ; Vince et Tiberghien, 2012, 2015 - Figure 22 - ; Ducourant, 2019). La représentation initiale n'a toutefois pas complètement disparu (Morge et Buty, 2014) (Figure 24, Figure 25). À notre connaissance, cette évolution de la représentation des chaînes s'est faite sans justification particulière – probablement parce qu'il est plus simple de représenter une ellipse qu'un rectangle avec encoche, notamment par ordinateur, et parce que cette nouvelle forme de représentation met en évidence de façon plus flagrante la différence entre les *réservoirs* et les *convertisseurs*.

Soulignons aussi que les transferts sont représentés par des flèches soit classiques, soit dont la pointe est représentée au milieu du segment (Figure 22) et non en bout de segment. Nous n'avons pas trouvé de justification particulière à cette modification.

Enfin, nous notons une absence de consensus concernant l'endroit où doivent être écrits les noms des systèmes considérés : ils le sont parfois dans les figures géométriques, et parfois en-dessous ou au-dessus.

48 Dans la plupart de ces articles, les auteurs ne précisent pas les sources dont ils se sont servis pour élaborer leurs chaînes. Cependant, puisqu'ils proposent des chaînes identiques à celles que nous avons déjà évoquées et/ou des règles de construction identiques à celles de la Figure 16, nous considérons qu'ils se réfèrent aux chaînes proposées par l'équipe COAST.

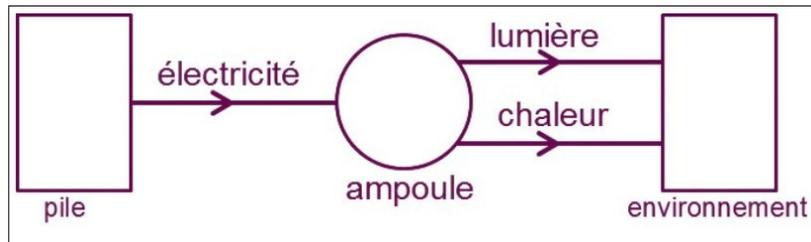


Figure 22 : chaîne énergétique proposée par Vince et Tiberghien (2015, p.1106)

Chaînes proposées par Millar (2005)

Millar (2005) propose des chaînes *pendant* dans lesquelles les flèches ne distinguent pas les transferts d'énergie uniquement en fonction du type de transfert, mais mettent en évidence la dégradation de l'énergie. La figure reproduite ci-après (Figure 23) illustre cela : la dégradation de l'énergie est représentée par la flèche sur laquelle est écrit « transferred mechanically (due to friction) and by heating »⁴⁹.

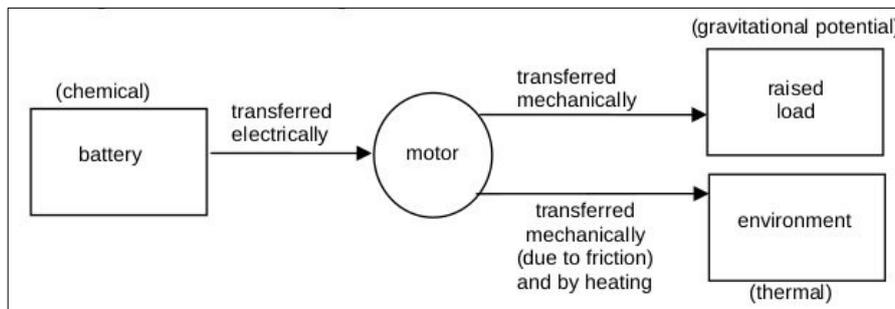


Figure 23 : chaîne proposée par Millar (2005, p.15)

Chaînes proposées par Morge et Buty (2014)

Morge et Buty (2014) explorent les possibilités de représentation de chaînes énergétiques complexes, qui concernent la convection (nécessite de représenter le déplacement d'une portion d'air, figure 4, p.28) ou des systèmes biologiques (figure 5, p.31). Pour ce faire, ils doivent effectuer des ajustements dans les règles de représentation prévues initialement par Gaidioz *et al.* (1998), pour qui les chaînes ne peuvent pas représenter de phénomènes de convection.

49 Nous ne pouvons pas affirmer que « by heating » doive être compris comme « par chaleur » et non « par chauffage », mais nous le supposons.

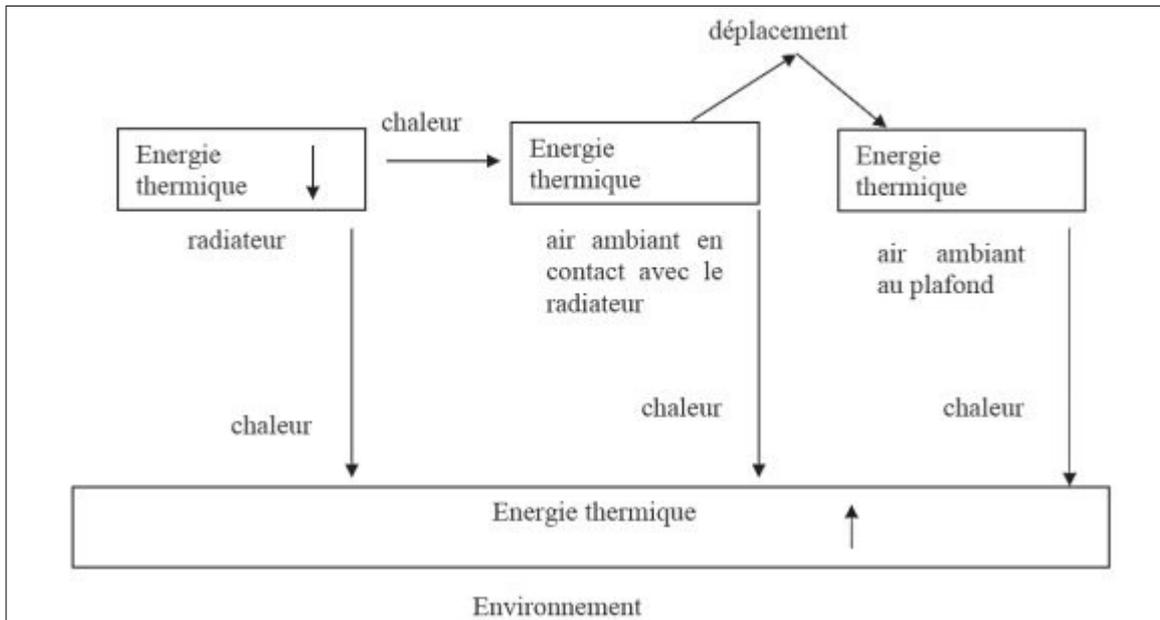


Figure 24 : chaîne énergétique représentant le déplacement d'une portion d'air par convection après avoir été chauffée par un radiateur (Morge et Buty, 2014, p.28)

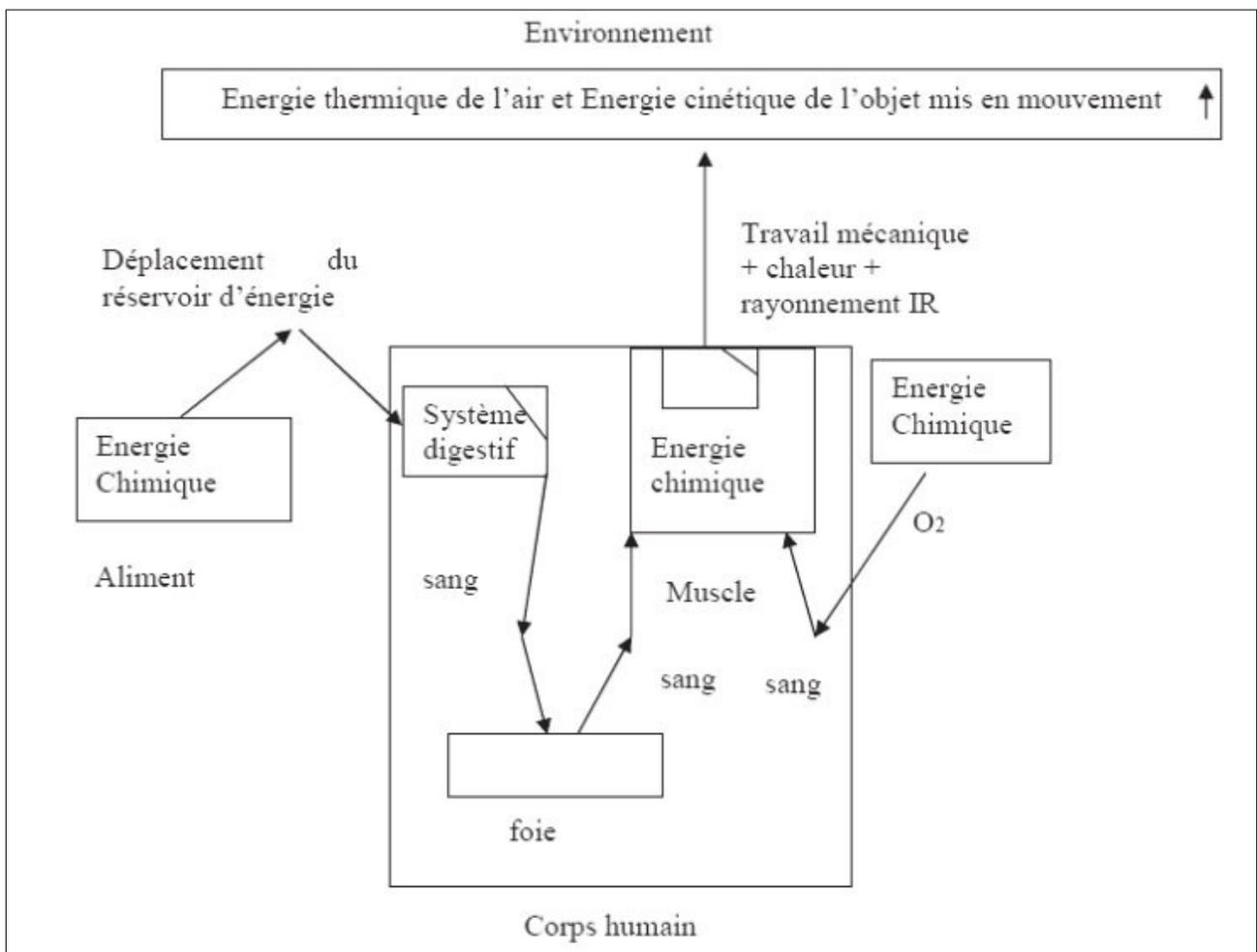


Figure 25 : chaîne énergétique très simplifiée [selon les auteurs] représentant le corps humain mettant en mouvement un objet après s'être alimenté (Morge et Buty, 2014, p.31)

Les chaînes qu'ils proposent sont différentes de celles que nous avons vues jusqu'à présent : il s'agit de chaînes *pendant* sur lesquelles figurent les formes d'énergie cédée et reçue par différents systèmes, qu'on représente habituellement plutôt sur des chaînes de type *avant-après*. Notons aussi que, sur la chaîne de la Figure 25, on remarque un réservoir qui reçoit de l'énergie – alors qu'aucun réservoir ne cède d'énergie par ailleurs. Enfin, nous remarquons que, si certaines flèches sont cohérentes avec une représentation instantanée d'un événement (chaleur, travail, rayonnement), d'autres représentent plutôt un déplacement, qui a lieu *a priori* dans l'espace et dans le temps.

Nous qualifions donc cette chaîne d'*hybride*, ni complètement instantanée, ni complètement inscrite dans une évolution temporelle.

Variante de chaînes état initial – état final

Les chaînes *état initial – état final* sont très peu présentes dans la littérature de didactique. Notons cependant une variante de ces chaînes *état initial – état final*, proposée par Ducourant⁵⁰ (2019, p.105) et proche de certaines de celles proposées par Gaidioz *et al.* (1998). Elle représente d'abord les systèmes à l'« instant initial » avec un certain niveau d'énergie par système, puis, en-dessous, les systèmes à un « instant intermédiaire » (les niveaux d'énergie ont évolué), et encore en-dessous, les systèmes à l'« instant final » (les niveaux d'énergie ont encore évolué). Seuls les réservoirs figurent sur cette représentation (les convertisseurs n'y apparaissent pas).

50 Ducourant n'est pas une chercheuse en didactique, mais une enseignante de physique qui a écrit plusieurs articles relatifs à l'enseignement de l'énergie. Puisqu'il s'agit des seuls articles mentionnant des chaînes avant-après, nous avons choisi de les mentionner ici.

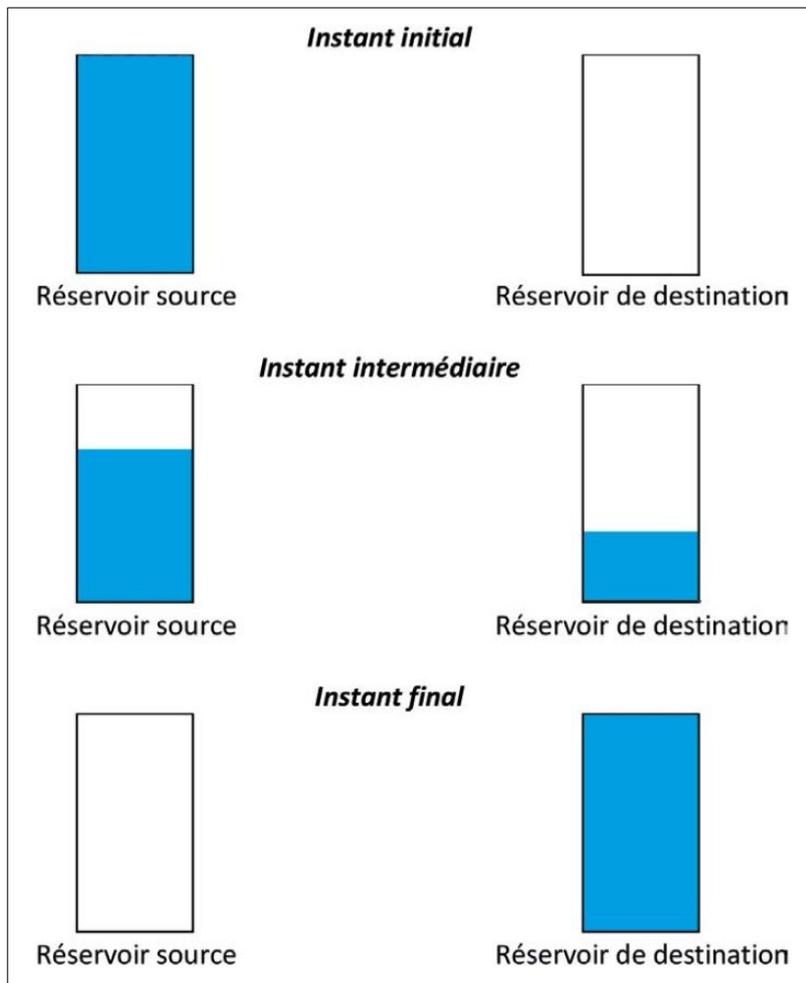


Figure 26 : chaîne état initial - état final proposée par Ducourant (2019, p.105)

Chaînes de flux

Certains auteurs proposent une représentation des phénomènes énergétiques sous la forme d'un diagramme de Sankey. En particulier, ce type de représentations tend à être intégré à l'enseignement secondaire en Grèce (Peixos, juillet 2023, discussion informelle).

Millar (2005, p.16) utilise ce type de représentation pour mettre en évidence les flux d'énergie entre des systèmes ; notons que ces systèmes ne sont pas clairement identifiables sur son schéma (Figure 27).

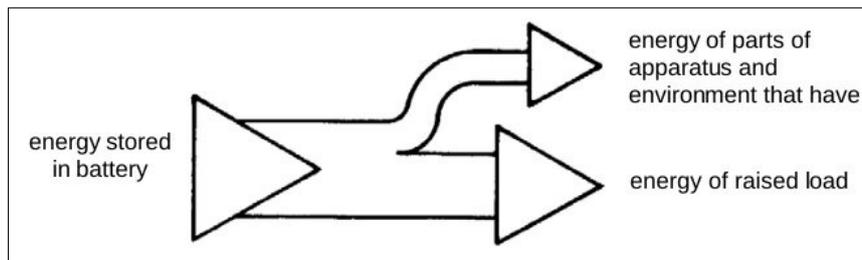


Figure 27 : chaîne de flux proposée par Millar (2005, p.15)

Il n'y a ni échelle ni valeurs qui permettent de déterminer les quantités associées à ces flèches, ni s'il s'agit de puissances ou d'énergies. Cependant, les indications laissent supposer une évolution temporelle selon le sens des flèches (à gauche est représentée l'énergie stockée dans une batterie, à droite sont représentées les énergies qui ont été transférées aux systèmes receveurs). Il s'agirait donc d'une chaîne *hybride*, puisqu'elle représente à la fois des flux (instantanés) et un ensemble situation initiale - situation finale (évolution temporelle).

Scherr et ses collègues (2012, p.9) présentent un diagramme de Sankey qui illustre l'utilisation de l'énergie aux États-Unis en 2010. Pour construire un diagramme énergétique de Sankey, il faut, selon ces auteurs, identifier les donneurs d'énergie et les receveurs d'énergie ainsi que les proportions dans lesquelles ils donnent ou reçoivent certaines « catégories » d'énergie. Le terme « catégories » peut englober diverses sources d'énergie ou diverses « formes » d'énergie (qu'ils regroupent en énergie *utile* et énergie *perdue*) sur un même diagramme. Nous pensons que ce diagramme est associé à une évolution temporelle de la situation, puisque les flèches épaisses qui y figurent représentent des quantités d'énergie transférées.

Chaînes proposées par Givry et Pantidos (2015)

Givry et Pantidos (2015) ne s'intéressent qu'aux situations où deux objets sont en interaction directe. Cela donne des représentations où figurent deux systèmes entre lesquels se trouve une flèche, qui symbolise le transfert d'énergie qui a lieu entre eux. Dans chaque système, on voit un diagramme en bâtons, où chaque bâton représente une forme d'énergie (énergie potentielle élastique, énergie cinétique, énergie potentielle chimique, énergie potentielle gravitationnelle). Si la quantité d'une forme d'énergie varie au cours du temps, cette variation est représentée par deux niveaux distincts sur le bâton, reliés entre eux par une flèche qui part de la valeur initiale d'énergie et atteint la valeur finale d'énergie (Givry et Pantidos, 2015, p.46).

Cette chaîne est associée à un événement ponctuel, mais présente une dimension temporelle, qui n'est pas représentée par la flèche principale située entre les systèmes, mais par les flèches contenues dans les rectangles, associées aux formes d'énergie qui évoluent au cours du temps.

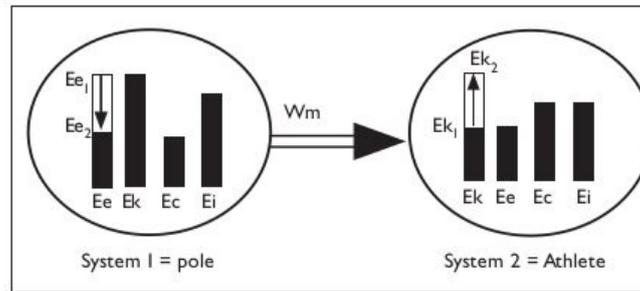


Figure 28 : chaîne énergétique représentant le transfert d'énergie entre une perche et un athlète (Givry et Pantidos, 2015, p.46)

4.4. Chaînes énergétiques et difficultés d'apprentissages

Malgré la promotion de l'utilisation de chaînes énergétiques dans l'enseignement depuis plusieurs décennies en didactique, aucune étude n'a, à ce jour et à notre connaissance, permis de mettre en évidence les effets sur les apprentissages liés à l'utilisation d'un certain type de chaînes. Dans cette section, nous allons discuter des difficultés d'apprentissage qui pourraient être initiées ou renforcées par l'utilisation de certaines chaînes énergétiques.

Raisonnement causal linéaire

Le raisonnement causal linéaire est un type de raisonnement largement mis en œuvre par les élèves et par les étudiants pour expliquer des phénomènes physiques qui ont pourtant lieu de façon simultanée (Viennot, 1993 ; 1996, chap.5), parmi lesquels les phénomènes énergétiques.

Comme le synthétisent Ballini et ses coauteurs (1997) :

« Ce mode de raisonnement se caractérise par la recherche d'une relation causale du type $A \Rightarrow B$, telle qu'une modification de B soit sans influence sur A, et qu'une modification de A n'intéresse B qu'avec un certain retard lié à une propagation. Un tel raisonnement constitue un obstacle de trois points de vue.

- En refusant l'effet de rétroaction de B sur A, il fait obstacle à l'acquisition de modes de raisonnement utilisés dans les nombreux cas de causalité physique réciproque ou circulaire (sens défini par Halbwachs, 1971).

- En attribuant à l'effet un retard systématique par rapport à la cause, il fait obstacle à l'acquisition des raisonnements classiques portant sur les transformations quasi-statiques dans lesquelles les relations numériques reliant les différentes variables sont à tous moments vérifiées. L'implication logique qui caractérise ces situations se démarque de la chronologie.

- Un tel raisonnement est essentiellement local en ce sens qu'il ne prend pas comme objet d'étude un système caractérisé par son état et ses interactions, mais une entité (énergie, chaleur, électricité, signal...) qui subit en général un déplacement, et qui rencontre des oppositions au cours de celui-ci. » (Ballini *et al.*, 1997, p.82-83)

La représentation sous forme de chaîne énergétique est conforme à un raisonnement de type linéaire causal : elle se lit de gauche à droite en suivant une ou plusieurs flèches, les systèmes représentés à gauche pouvant être assimilés à des agents causaux dont les effets sont représentés à

droite. L'utilisation d'une chaîne énergétique peut donc engendrer ou conforter un mode de raisonnement porteur de difficultés pour les élèves.

Le problème que nous soulevons ici a déjà été mentionné à plusieurs reprises dans des textes relatifs à l'enseignement de l'énergie *via* l'utilisation de chaînes énergétiques (Bental et al, 1997 ; Bécu-Robinault, 1997 ; Gaidioz *et al.*, 1998). Conscients des difficultés associées aux raisonnements linéaires causaux, les auteurs pensent toutefois qu'ils peuvent servir de levier pour une première approche des phénomènes énergétiques.

Substantialisation de l'énergie

Dans une chaîne énergétique, l'énergie est « localisée » – voire stockée – dans des systèmes, elle « passe » d'un système à un autre, certains systèmes « cèdent » de l'énergie tandis que d'autres en « reçoivent ». Certaines chaînes permettent aussi de visualiser des « flux » d'énergie.

Ce vocabulaire, utilisé pour décrire l'énergie en « lisant » des chaînes énergétiques, est associé à une vision substantialiste de l'énergie – ou, du moins, est parfaitement compatible avec le fait de croire que l'énergie est une substance (fluide). De la même manière, lorsqu'on représente l'énergie par un diagramme en bâton associé à un système, cette grandeur est facilement assimilable à une substance.

Les chercheurs qui se sont intéressés à cela avancent qu'une approche de l'énergie substantialiste peut être un levier – voire une nécessité – pour l'apprentissage d'un premier germe de modèle scolaire de l'énergie (Brewer, 2011 ; Millar, 2005).

Quantification de l'énergie associée à un système et à des transferts d'énergie

Certaines chaînes mettent en évidence une quantification de l'énergie contenue dans les systèmes, ce qui suggère qu'il existe une quantité d'énergie *absolue* dans un système. Nous avons vu précédemment qu'il est plus juste de quantifier les échanges d'énergie que de parler de la valeur d'énergie absolue d'un système (§2.3).

Par ailleurs, ces représentations de valeurs d'énergie au sein de chaînes énergétiques sont uniquement figuratives (Figure 15, Figure 20, Figure 21, Figure 26, Figure 28) : elles ne sont associées à aucune valeur numérique, ni à aucune échelle. Il arrive que plusieurs valeurs « graphiques » (sous la forme de diagramme en bâton) figurent sur une même chaîne (soit pour représenter l'énergie contenue dans différents systèmes, soit pour représenter la valeur associée aux différentes formes d'énergie pour un même système), alors que rien ne permet *a priori* de les comparer numériquement.

De la même manière, la représentation des différentes formes d'énergie contenues dans un système par des diagrammes en bâtons suggère une répartition de l'énergie en plusieurs types d'énergie et peut contribuer à entretenir la croyance que la somme des valeurs d'énergie associées aux différentes formes d'énergie est égale à l'énergie totale du système – ce qui ne peut être vérifié qu'en faisant preuve d'une très grande rigueur dans la dénomination des formes et d'une totale exhaustivité dans leur représentation.

Enfin, lorsque l'énergie est représentée par un bâton mais n'est pas quantifiée, quel sens un élève va-t-il donner à ce bâton et à la valeur qui lui est implicitement associée – ainsi qu'aux valeurs minimum et maximum représentables ?

Dans notre revue de littérature, nous avons remarqué plusieurs chaînes qui comportaient des flèches « épaisses », sans qu'un sens soit *a priori* associé à cette caractéristique. C'est le cas de la chaîne représentée en Figure 28 et de celle que nous représentons ci-dessous, issue de Ducourant (2019) (Figure 29). Nous pensons que ces flèches épaisses peuvent être source de confusion pour les élèves – notamment parce qu'elles peuvent contrevenir à l'idée de conservation locale de l'énergie.

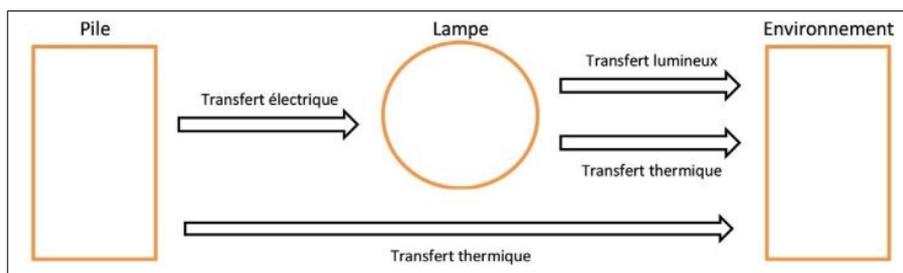


Figure 29 : chaîne à flèches épaisses (Ducourant, 2019, p.103)

Les questions soulevées restent ouvertes puisqu'elles n'ont, à notre connaissance, jamais donné lieu à des recherches en didactique de la physique.

Hétérogénéité des représentations

Les chaînes énergétiques que nous avons décrites sont toutes issues de la recherche en didactique (à l'exception de celles proposées par Ducourant, 2019). Elle sont nombreuses et, même lorsqu'elles représentent un même événement et les mêmes caractéristiques de l'énergie, elles n'utilisent pas un formalisme commun.

Nous pouvons supposer qu'une telle hétérogénéité dans les représentations est, en soit, une difficulté majeure pour l'enseignement du concept d'énergie dans un contexte scolaire.

4.5. Caractéristiques de l'énergie représentées par les chaînes énergétiques

L'utilisation d'une chaîne énergétique peut être vue sous un angle praxéologique (en référence à la TAD, Chevallard, 1998) : résoudre une tâche à l'aide d'une chaîne nécessite la mise en œuvre d'une technique, et l'association d'une tâche à une technique compose un savoir-faire (*praxis*). La technique utilisée est justifiée par une technologie, « caractérisée par un ensemble d'énoncés qui peuvent avoir différents statuts : définition, théorème, propriétés, théorème-en-acte, règle du contrat didactique » (Tang, 2014). Ces énoncés sont eux-mêmes justifiés par ce que Chevallard appelle « théorie ». L'ensemble de ces éléments – technologies et théories – composent le savoir (*logos*).

Dans le cas des chaînes énergétiques, les théories – notées Θ – sont identifiables à certaines des caractéristiques de l'énergie pour l'enseignement (Tableau 1).

Dans cette section, nous reprenons certaines des chaînes évoquées précédemment, afin de déterminer quelles caractéristiques de l'énergie – ou théories – elles représentent. Ces chaînes sont⁵¹ :

- les chaînes énergétiques proposées par Lemeignan et Weil-Barais (1992, 1993) ;
- les chaînes *avant-pendant-après* proposées par Lemeignan et Weil-Barais (1992, 1993) ;
- les chaînes *pendant* proposées par l'équipe COAST (Gaidioz *et al.*, 1998) ;
- les trois versions de chaînes état initial – état final proposées par l'équipe COAST (Gaidioz *et al.*, 1998) ;
- les chaînes proposées par Millar (2005) ;
- les chaînes proposées par Givry et Pantidos (2015).

Le Tableau 2 ci-après récapitule les descriptifs de ces différentes chaînes.

51 Les variantes des chaînes COAST qui ne présentent que des différences de forme avec ces dernières (dénomination, représentation des convertisseurs) ne feront pas l'objet d'une étude particulière. Les chaînes proposées par Morge et Buty, de type *hybride*, de seront pas analysées du fait de leur complexité, tout comme les chaînes de flux, dont les règles de représentation n'ont pas pu être mises clairement en évidence.

Référence	Type de chaîne, dénomination	Description
Chaîne <i>énergétique</i> , Lemeignan et Weil Barais (1992, 1993)	pendant, P1	<ul style="list-style-type: none"> - Réservoir initial, représenté par une ellipse - Réservoir final, représenté par une ellipse - Convertisseurs, représentés par des ellipses - Transferts, représentés par des flèches et nommés (ex: Q, Wm, We, γ) - Formes d'énergie, inscrites dans les réservoirs (ex: "Ex", "Et" pour "énergie chimique", "énergie thermique") <p><i>Possibilité d'ajouter:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> - Réservoir poubelle, représenté par une ellipse grisée - Transferts à destination du réservoir poubelle, associés à une énergie "inutile", représentés par des flèches verticales vers le bas, en provenance des flèches et des réservoirs de la chaîne initiale
Chaîne <i>avant-pendant-après</i> , Lemeignan et Weil Barais (1992, 1993)	avant-après, AA1	<ul style="list-style-type: none"> - Réservoir source, représenté par une ellipse, trois fois: "avant", "pendant" et "après", les uns en dessous des autres - Réservoir récepteur, représenté par une ellipse, trois fois: "avant », "pendant" et "après", les uns en dessous des autres - Convertisseur, représenté par une ellipse, entre les réservoirs initial et final de la ligne "pendant" - Transferts, représentés par des flèches de part et d'autre du convertisseur, associés à une puissance ("Pe" et "Ps" pour "puissance entrante", "puissance sortante") - Axes d'énergie, représentés dans les réservoirs, verticaux orientés vers le haut et notés "E" - Niveaux d'énergie, représentés dans les réservoirs "avant" (par un trait horizontal sur l'axe "E") et "après" (représentation identique à la représentation "avant", à laquelle est ajoutée un second trait horizontal, plus haut ou plus bas que le premier; une flèche verticale part du premier trait et pointe vers le second), et par un "?" dans les réservoirs "pendant"
Chaîne <i>pendant</i> – COAST (Gaidioz et al., 1998)	pendant, P2	<ul style="list-style-type: none"> - Réservoirs, représentés par des rectangles - Convertisseurs, représentés par des cercles* - Transferts d'énergie, représentés par des flèches nommées (travail électrique, travail mécanique, chaleur, rayonnement) <p>Représente une situation à un instant (pas d'évolution temporelle). La chaîne commence et se termine par un réservoir. Le réservoir initial est différent du réservoir final.</p> <p>Les modes de transfert "entrant" et "sortant" d'un convertisseur sont différents l'un de l'autre. Les réservoirs peuvent recevoir de l'énergie, donner de l'énergie, ou recevoir et donner de l'énergie, à condition que cela se fasse par un même mode de transfert.</p> <p>Les réservoirs et les transformateurs effectuent des transferts d'énergie thermiques à destination du réservoir final : l'environnement. Il est possible de représenter deux transferts d'énergie thermiques en sortie d'un réservoir ou d'un transformateur : un, à destination d'un autre réservoir ou transformateur, l'autre, à destination de l'environnement.</p> <p>Il est possible d'ajouter des valeurs ou des indications de puissance sous les flèches.</p>
Chaîne <i>état initial – état final</i> – COAST (Gaidioz et al., 1998)	avant-après, AA2	<ul style="list-style-type: none"> - Réservoirs "initiaux", représentés par des rectangles, sur la gauche - Réservoirs "finaux", représentés par des rectangles, sur la droite - Niveaux d'énergie "initiaux", représentés par une ligne pointillée horizontale dans chaque réservoir initial - Niveaux d'énergie "finaux", représentés par une ligne pleine horizontale dans chaque réservoir final
Chaîne <i>état initial – état final</i> combinée – COAST (Gaidioz et al., 1998)	avant-après, AA3	<ul style="list-style-type: none"> - Réservoirs, représentés par des rectangles - Niveaux d'énergie initiaux, représentés par des lignes pointillées dans les rectangles - Niveaux d'énergie finaux, représentés par des lignes pleines dans les rectangles - Variations d'énergie, représentées dans chaque rectangle par une flèche verticale "ΔE" qui part de la ligne pointillée et pointe sur la ligne pleine
Chaîne <i>état initial – état final</i> mécanique et chimie – COAST (Gaidioz et al., 1998)	avant-après, AA4	<ul style="list-style-type: none"> - Réservoirs, représentés par des rectangles, trois** fois: "avant", "pendant" et "après", les uns en dessous des autres - Formes d'énergie contenue dans les réservoirs, représentées par des zones hachurées dans les rectangles (un type de hachures correspond à une forme d'énergie ; à l'instant initial, le premier réservoir est totalement hachuré et le dernier réservoir est totalement laissé en blanc)
Chaîne Millar (2005)	pendant, P3	Chaîne semblable à P2 dans laquelle les flèches représentent des transferts regroupés selon leurs mécanismes (distinction transferts mécaniques « utile » et de frottement, par exemple)
Chaîne Givry et Pantidos (2015)	avant-après, AA5	<ul style="list-style-type: none"> - Systèmes, représentés par des cercles (système 1 à gauche ; système 2 à droite) - Flèche épaisse entre les cercles, qui représente l'énergie fournie au système 2 par le système 1 - Bâtons associés à des formes d'énergie, représentés dans les cercles (quatre bâtons par cercle : Ee ; Ek, Ec, Ei) - Niveaux d'énergie, représentés par la hauteur des bâtons - Un bâton peut être séparé en deux parties : le niveau "E1***" et le niveau "E2***" - La variation d'énergie entre E1 et E2 est représentée par une flèche verticale allant de E1 vers E2

* Dans la version originale, ils sont représentés par des rectangles à encoche

** Il est possible d'avoir plus d'états représentés (voir figures 24 et 25, chapitre 4)

*** Selon la forme d'énergie, E1 (et E2) se notent Ee1, Ek1 (resp. Ee2, Ek2) etc.

Tableau 2: descriptif de chaînes énergétiques proposées en didactique

Nous allons déterminer quelles sont les caractéristiques attribuables au concept scolaire d'énergie qui sont représentées (sont-elles rendues visibles aux yeux d'un observateur de la chaîne ?) ou pourraient être représentées sur ces chaînes.

Dans le Tableau 3 ci-après, pour chacune des chaînes analysées :

- le signe « ++ » indique que la représentation d'une caractéristique au sein de la chaîne est visible de façon manifeste ;
- le signe « + » indique qu'il y a des traces de la représentation de cette caractéristique ;
- le signe « = » indique que cette caractéristique pourrait être représentée sur la chaîne par l'ajout simple d'une information, sans modification de la structure et des règles de représentation.

Précisons les critères d'attribution de ces signes selon les caractéristiques :

Grandeur :

« ++ » Des valeurs d'énergie ou de différences d'énergie sont directement lisibles sur la chaîne.

« + » L'énergie est quantifiable numériquement ou graphiquement (par exemple, par l'utilisation d'une échelle).

« = » Il est possible d'indiquer des valeurs d'énergie sur la chaîne.

Puissance :

« ++ » Une valeur de puissance figure sur la représentation.

« + » La puissance est quantifiable numériquement ou graphiquement (par exemple, par l'utilisation d'une échelle).

« = » Il est possible de faire figurer une valeur de puissance sur la chaîne.

Conservation de l'énergie :

« ++ » L'énergie de l'ensemble des systèmes représentés est quantifiable⁵² à l'instant initial et à l'instant final et on remarque une égalité entre ces deux valeurs.

« = » Il est possible d'indiquer des valeurs d'énergie à l'instant initial et à l'instant final sur la chaîne.

Conservation locale de l'énergie :

« ++ » Les flux d'énergie (ou puissances) sont quantifiables, et la somme de ceux qui entrent dans un système dont la quantité d'énergie ne varie pas⁵³ est de même valeur que la somme de ceux qui en sortent.

« = » Il est possible d'indiquer des valeurs de flux d'énergie (ou puissance) sur la chaîne afin de rendre visible que la somme des flux d'énergie qui entre dans un système dont la quantité d'énergie ne varie pas⁵³ est égale à la somme des flux d'énergie qui en sortent.

Dégradation⁵⁴ de l'énergie :

« + » Les transferts associés à la dégradation de l'énergie se distinguent des autres (types de flèches, lieu de destination...)

« + » Le fait que la quantité d'énergie thermique augmente au cours du temps est mis en évidence.

Transferts d'énergie :

« ++ » Une flèche sans épaisseur est représentée entre un système qui donne de l'énergie et un système qui reçoit cette énergie.

52 Il n'est évidemment pas question de quantifier l'énergie *totale* du système.

53 Il doit être clairement identifié en tant que tel.

54 Cette propriété est difficile à mettre en évidence sur une chaîne énergétique ; nous n'avons pas trouvé comment la représenter de façon manifeste.

« + » Une flèche épaisse⁵⁵ est représentée entre un système qui donne de l'énergie et un système qui reçoit cette l'énergie.

Formes d'énergie :

« ++ » Différentes formes d'énergie sont mentionnées sur la chaîne pour un même système.

« + » Différentes formes d'énergie sont mentionnées sur la chaîne (mais pas pour un même système).

« = » Il est possible d'indiquer sur la chaîne certaines formes d'énergie (comme celles dont la quantité a varié au cours du temps).

Conversion d'énergie :

« ++ » Deux modes de transfert différents sont indiqués de part et d'autre d'un même système.

« + » Deux modes de transfert peuvent être indiqués de part et d'autre d'un même système, mais certaines flèches ne sont pas associées à un transfert ou mode de transfert en particulier.

« = » Il est possible de représenter deux modes de transfert différents de part et d'autre d'un même système.

Transformation d'énergie :

« ++ » La chaîne représente le changement de forme de l'énergie au sein d'un système au cours du temps.

« = » Il est possible de représenter le changement de forme de l'énergie au sein d'un système au cours du temps sur la chaîne.

Modification d'énergie :

« ++ » La forme de l'énergie associée à une variation d'énergie dans le système initial est différente de la forme d'énergie associée à une variation d'énergie dans le système final.

« = » Il est possible d'indiquer sur la chaîne que la forme de l'énergie associée à une variation d'énergie dans le système initial est différente de la forme d'énergie associée à une variation d'énergie dans le système final.

Stockage de l'énergie :

« ++ » Les systèmes qui subissent une variation d'énergie sont représentés⁵⁶ différemment de ceux qui n'en subissent pas, et, s'il y a des flèches, elles ne sont pas associées à des formes d'énergie.

« + » Des variations d'énergie sont visibles pour certains systèmes.

Selon nous, le caractère abstrait de l'énergie ne peut pas être mise en évidence sur les chaînes énergétiques, substantialistes par essence (§4.4).

Par ailleurs, il est difficile de déterminer dans quelle mesure une catégorie de chaînes énergétiques met en évidence le caractère unificateur de l'énergie : cela dépend essentiellement de la variété de situations dans laquelle ses auteurs proposent de l'utiliser.

Les caractéristiques d'abstraction et d'universalisme de l'énergie ne pouvant pas être représentées sur des chaînes énergétiques, nous n'y faisons pas référence dans cette section.

55 Nous considérons que l'attribution d'une épaisseur à une flèche laisse supposer qu'elle représente quelque chose de quantifiable, or, un transfert – ou mode de transfert – ne l'est pas.

56 ou identifiés, par exemple par l'utilisation du terme « réservoir » dans la chaîne AA2

	chaînes <i>pendant</i>			chaînes <i>avant-après</i>				
	P1	P2	P3	AA1	AA2	AA3	AA4	AA5
Θ(grandeur)	+			++	+	++	++	++
Θ(puissance)	=	++	=	(++)*				
Θ(conservation)				++	++	++	++	++
Θ(conservation locale)	=	=	=	(=)*				
Θ(dégradation)	+	+	+					
Θ(transfert)	++	++	+	(++)*				++
Θ(formes)	+			=	=	=	++	++
Θ(conversion)	++	++	+					
Θ(transformation)							++	
Θ(modification)				=	=	=		++
Θ(stockage)		++	++	+	++	++	++	++

*Nous notons entre parenthèses les caractéristiques représentées sur la chaîne P1, incluse dans AA1

Tableau 3: caractéristiques de l'énergie représentées sur des chaînes issues de travaux en didactique

Nous remarquons qu'aucune des chaînes que nous avons analysées ne permet de représenter l'ensemble des caractéristiques de l'énergie.

Les transferts et les conversions d'énergie sont représentées sur toutes les chaînes de type *pendant*, bien que les chaînes P3 ne proposent pas une distinction franche entre les différents modes de transfert. En revanche, d'autres caractéristiques ne figurent pas sur ces chaînes :

- celles qui sont liées à l'existence de formes d'énergie : les transformations et modifications ont lieu *au cours du temps*, il était donc prévisible de ne pas les voir mentionnées ici⁵⁷, tout comme les formes d'énergie (bien que certaines soient évoquées dans P1) ;
- la conservation de l'énergie, ce qui était prévisible, puisque cette propriété de l'énergie se manifeste *au cours du temps* ;
- la quantification de l'énergie (grandeur) n'apparaît pas sur ces chaînes, probablement parce que les différences d'énergie ne peuvent pas y être mises en évidence.

À l'inverse, toutes les chaînes de types *avant-après* mettent l'accent sur la quantification et la conservation de l'énergie, ainsi que sur son stockage. Ces chaînes peuvent également représenter les différentes formes d'énergie et les transformations, à l'instar de deux des cinq chaînes *avant-après* que nous avons analysées. Parmi les chaînes *avant-après*, seule la chaîne AA5 représente des transformations d'énergie au sein d'un système, mais elle ne peut pas représenter de modifications de l'énergie, à l'inverse des autres.

Si nous voulons représenter le plus grand nombre de caractéristiques de l'énergie, il apparaît nécessaire de ne pas privilégier un seul type de chaînes, mais de recourir à plusieurs d'entre elles, en fonction des aspects du modèle à étudier : une chaîne de type *pendant*, une chaîne de type *avant-après* illustrant les transformations d'énergie au sein d'un système, et une chaîne de type *avant-après* illustrant les modifications d'énergie entre plusieurs systèmes. Ceci rejoint les propositions de Lemeignan et Weil-Barais (1992, 1993), qui recommandent de combiner l'utilisation de chaînes P1 et AA1 (mais ne prennent pas en compte les transformations d'énergie), et, surtout, celles de

57 Sur une chaîne *pendant*, il est toutefois possible de représenter l'évolution instantanée de certaines variables. Nous constatons que les auteurs ne le font pas.

Gaidioz *et al.* (1998), qui recommandent l'utilisation d'une grande variété de chaînes selon les besoins (P2, AA2, AA3, AA4).

4.6. Conclusion

La chaîne énergétique, souvent proposée comme une représentation unificatrice, applicable à différents domaines scientifiques, n'est pas un objet clairement défini en didactique des sciences – ni même en didactique de la physique. En plus de la multiplicité des chaînes existantes, un obstacle majeur à la promotion d'une représentation commune est lié à un manque de clarté et d'unification concernant le vocabulaire utilisé pour parler des phénomènes énergétiques dans un contexte scolaire.

Nous avons mis en évidence l'existence de différents types de chaînes, répartis en deux grandes catégories : celles qui représentent un instantané et celles qui représentent l'évolution temporelle d'un phénomène énergétique. Ces catégories de chaînes sont complémentaires, l'utilisation d'un type de chaîne permettant de mettre en évidence un certain nombre de caractéristiques de l'énergie, mais en occultant d'autres. Ainsi, il ne semble pas possible de représenter l'ensemble des caractéristiques de l'énergie sur une unique chaîne énergétique.

Par ailleurs, il apparaît que, quelle que soit sa forme, la chaîne énergétique ne permet que difficilement de représenter la dégradation de l'énergie.

Les chaînes de type *pendant* sont largement plus évoquées en didactique que les chaînes de type *avant-après*.

Toutes ces chaînes s'appuient sur un raisonnement séquentiel linéaire causal et sur une vision substantialiste de l'énergie, qui peuvent être considérés comme des leviers favorisant les apprentissages. Cependant, leur utilisation peut renforcer une vision consumériste de l'énergie, incompatible avec le principe de conservation de l'énergie, mais cohérente avec le concept sociétal d'énergie, dans le sens où elles sont susceptibles de mettre en évidence l'épuisement des ressources énergétiques, ce qui en fait une entrée possible pour comprendre certains enjeux sociétaux liés à l'énergie.

Conclusion de la première partie

À travers cette première partie, nous avons voulu ancrer notre travail dans la physique et dans la didactique de la physique.

Nous avons esquissé les contours de la théorie scientifique de l'énergie, en nous appuyant particulièrement sur le modèle scientifique de l'énergie issu de la thermodynamique, science des transferts de l'énergie. Nous avons montré en quoi le concept d'énergie est un concept unificateur par essence, qui nécessite l'élaboration et l'utilisation de modèles dans les différents domaines scientifiques. L'ensemble de ces modèles sont cohérents avec le concept d'énergie, mais ils présentent des spécificités et un champ d'application particulier. Ils composent la théorie scientifique de l'énergie.

En didactique, l'enseignement et l'apprentissage de l'énergie ont donné lieu à de nombreux travaux : les erreurs conceptuelles habituelles des élèves et des enseignants ont été mises en évidence et des propositions d'enseignement permettant une meilleure appropriation de ce concept ont été faites. En France, des modèles scientifiques scolaires de l'énergie ont été développés, qui prennent appui en particulier sur une activité de modélisation et de représentation par des chaînes énergétiques. Les caractéristiques associées à l'énergie à travers ces modèles scolaires sont nombreuses et leur définition n'est pas toujours consensuelle.

L'enseignement de l'énergie dans le secondaire a une visée double : d'une part, permettre aux élèves une poursuite d'études par une bonne appropriation du concept scientifique scolaire d'énergie ; d'autre part, permettre aux élèves d'appréhender le concept sociétal d'énergie en regard de connaissances scientifiques solides liées à l'énergie. Le concept scientifique et le concept sociétal d'énergie ne reposant pas sur les mêmes caractéristiques de l'énergie et n'utilisant pas un vocabulaire commun, ils sont en tension permanente, c'est pourquoi ces objectifs d'apprentissage paraissent particulièrement difficiles à atteindre.

Nous avons mis en évidence que plusieurs modèles scientifiques scolaires de l'énergie sont promus en didactique. Ils s'appuient sur différentes caractéristiques de l'énergie, auxquelles ils n'attribuent pas toujours le même sens, et ils proposent une grande variété de représentations pour les phénomènes énergétiques.

Ceci nous conduit à nous interroger sur les choix de modèles scientifiques scolaires – et de chaînes énergétiques – effectués par différents acteurs de l'enseignement.

Deuxième partie :

cadrage théorique et méthodologique

*« La voisine est étudiante
Mais elle est quand même gentille
Elle prépare une thèse sur Kant
Elle me la fera lire*

*Elle a monté ses affaires
Ses lunettes et son cartable
Posé son gros dictionnaire
Sur la table*

*Y'avait pas beaucoup d'images
La gamine a pas aimé
Lui a arraché toutes les pages
Sans s'presser »*

Renaud, « Baby-sitting Blues », 1985.

L'énergie est un concept difficile à définir, dont la théorie est composée de multiples modèles scientifiques. Les propriétés fondamentales de l'énergie, que partagent l'ensemble de ces modèles, sont son caractère transversal et unificateur, sa conservation et sa dégradation. Pour appréhender ce concept dans un contexte scolaire, il est nécessaire de construire et d'utiliser des modèles scientifiques scolaires de l'énergie, qui reposent *a priori* sur les mêmes propriétés. En didactique de la physique, plusieurs propositions ont été faites, et nous avons remarqué certaines divergences concernant en particulier les caractéristiques sur lesquelles reposent les modèles, les définitions choisies pour les formes et les transferts d'énergie, et les chaînes énergétiques élaborées pour la représentation des phénomènes énergétiques.

En 2015, le concept scolaire d'énergie est apparu dans le programme de Cycle 4 de physique-chimie comme thème d'enseignement à part entière. Les chaînes énergétiques ne sont pas mentionnées dans ce programme, qui ne donne pas d'indications – contraignantes ou non – quant à la progression attendue pour les apprentissages liés à l'énergie entre le début de Cycle 4 (classe de 5^e) et la fin du Cycle 4 (classe de 3^e). Plusieurs entretiens exploratoires et des discussions avec des auteurs de manuels scolaires nous ont permis de constater des difficultés d'appropriation de ce nouveau thème d'enseignement.

Pour ces raisons, nous nous posons la question de la nature du ou des modèles scientifiques scolaires de l'énergie « promus » de façon institutionnelle⁵⁸ pour l'enseignement de Cycle 4.

Cette deuxième partie est composée de trois chapitres, relativement courts, qui précisent le cadre théorique et méthodologique dans lequel notre travail s'est construit, et suivent une logique plutôt classique : nous commençons par décrire notre cadre théorique, qui s'appuie sur une triple approche didactique, ergonomique et épistémologique (chap.5), et nous permet de formuler et de justifier nos questions de recherche (chap.6). Nous présenterons ensuite la méthodologie que nous avons mise en œuvre pour répondre à l'ensemble de ces questions (chap.7).

58 Voir note n°8 et introduction du chapitre 5.

5. Cadre théorique

Dans notre travail de recherche, nous allons caractériser des modèles scientifiques scolaires de l'énergie, portés par diverses institutions. Comme évoqué dans l'introduction du premier chapitre (note n°8), nous regroupons sous le terme « institutions » les acteurs – au sens large – qui peuvent être considérés comme institutionnels par la communauté enseignante parce qu'ils fournissent aux enseignants des directives, ou, du moins, des propositions qui peuvent être perçues comme prescriptives, légitimées par un organe supérieur : les programmes scolaires, légitimés par le Conseil Supérieur des Programmes et le Ministère de l'Éducation Nationale ; les manuels scolaires, légitimés par l'usage, par les éditeurs et les directeurs de collection, qui sont le plus souvent des inspecteurs ou des universitaires ; les documents d'accompagnement du site Internet Eduscol (<https://eduscol.education.fr>), légitimés par le Ministère de l'Éducation Nationale ; les formateurs académiques, légitimés par l'Inspection Académique.

Nous nous posons la question des raisons qui justifient les choix de modèles effectués par ces acteurs institutionnels et, en particulier, par les formateurs académiques que nous avons interrogés et dont nous avons pu, pour certains, analyser les pratiques effectives de formation à l'énergie.

5.1. Une triple approche didactique, ergonomique et épistémologique

Une large partie de notre travail sera consacrée à l'étude de la formation continue à l'enseignement de l'énergie dans le secondaire, et, en particulier, à l'analyse de séances de formation à destination d'enseignants. Ces analyses aboutiront à une description fine des modèles scientifiques scolaires de l'énergie proposés par les formateurs, dont nous mettrons en évidence les logiques d'action, afin de justifier leurs choix et leurs pratiques de formation.

Pour décrire ces pratiques et les justifier, nous développons une adaptation de la double approche didactique et ergonomique (DADE), proposée par Robert et Rogalski en 2002. Elle a été élaborée dans une optique d'analyse de pratiques d'enseignants en classe, les pratiques d'un enseignant regroupant « tout ce qu'il pense, dit ou ne dit pas, fait ou ne fait pas, sur un temps long, avant, pendant et après la classe » (Robert, 2008). L'approche *didactique* met en évidence les tâches proposées par les enseignants et la manière dont elles sont mises en œuvre en classe ; l'approche *ergonomique* apporte des éléments de contexte (institutionnel, personnel et social) permettant d'expliquer ce qui se passe en classe. La DADE a pour objectif de mettre en évidence les logiques d'action des enseignants, comme le montre la Figure 30.

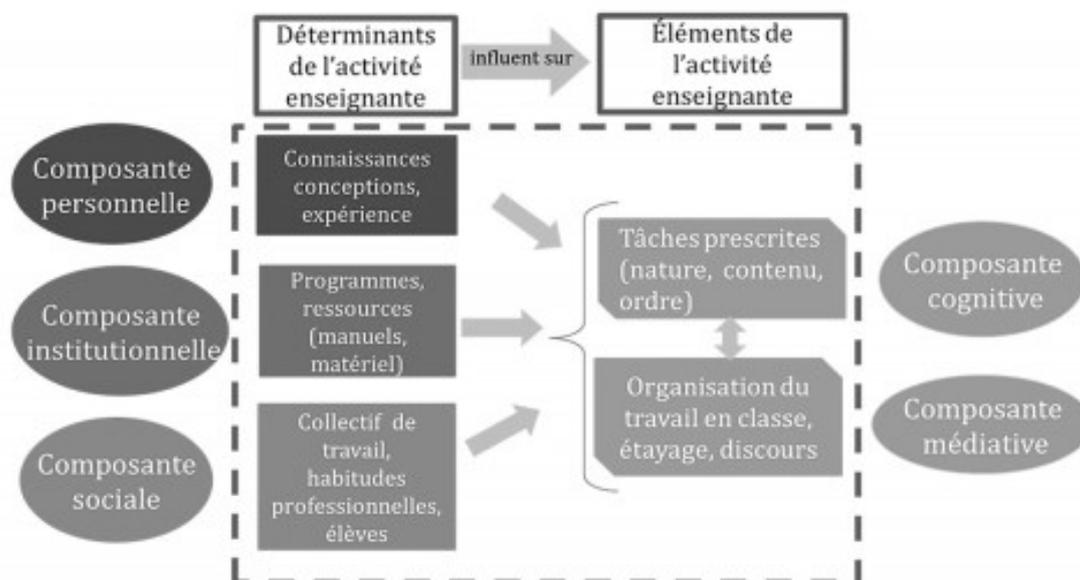


Figure 30: les cinq composantes des pratiques enseignantes selon la DADE à partir de Kermen, 2018 (Bouard et al., 2022).

Initialement mise en œuvre dans la recherche en didactique des mathématiques (Robert et Rogalski, 2002), elle a par la suite été adaptée et utilisée dans des travaux de didactique des sciences expérimentales (voir par exemple Kermen et Barroso, 2013 ; Kermen, 2018 ; Slimi, 2019 ; Crépin-Obert *et al.*, 2021 ; Canac *et al.*, 2021 ; Bouard *et al.*, 2022).

Présentée par ses autrices comme une approche souple plus que comme un cadre rigide, nous proposons une adaptation de la DADE pour une analyse de pratiques – déclarées et effectives – de formateurs. Dans cette adaptation, l’approche didactique met en évidence non seulement les tâches proposées par les formateurs à destination des enseignants-stagiaires, mais aussi les tâches proposées par les formateurs à destination d’élèves, qu’ils soumettent aux enseignants-stagiaires pendant la séance de formation comme exemples de « bonnes pratiques »⁵⁹. L’approche ergonomique reste similaire à celle de la DADE, bien que les déterminants de nature institutionnelle, sociale et personnelle ne soient pas les mêmes pour un enseignant que pour un formateur. Il est évident, par exemple, que les contraintes institutionnelles liées à la formation ne sont pas les mêmes que celles qui impactent les pratiques enseignantes, bien qu’elles puissent se recouvrir, *a minima* en ce qui concerne les contraintes liées au contenu des programmes.

Si l’adaptation de la DADE à l’analyse de pratiques de formation ne pose pas de problème majeur, la place du modèle scientifique scolaire de l’énergie proposé par les formateurs dans ce cadre est difficile à situer. Ce modèle, composé des caractéristiques de l’énergie qui le sous-tendent, des règles qui le régissent et des représentations qui lui sont associées, fait partie de l’activité du formateur, qui va le mettre en œuvre et le faire mettre en œuvre par les enseignants-stagiaires au cours de la formation. Mais il fait également partie des connaissances professionnelles du formateur, qui déterminent son activité. En d’autres termes, le modèle scientifique scolaire est un déterminant de l’activité du formateur tout en faisant partie de cette activité.

59 Dans le sens où ils les considèrent comme bonnes pour les apprentissages.

De ce fait, la DADE n'offre pas un cadre permettant de décrire et d'analyser les modèles scientifiques scolaires de l'énergie, et de comprendre les raisons pour lesquelles un modèle en particulier a été choisi. Cette description et cette analyse doivent se faire par une approche que nous qualifions d'épistémologique, en lien avec le concept d'énergie, la théorie scientifique de l'énergie et les connaissances issues de la recherche en didactique relatives au concept scolaire d'énergie.

Nous faisons l'hypothèse que les logiques d'action des formateurs comportent une dimension épistémologique majeure, imbriquée à la fois dans leur activité de formateur et dans leurs connaissances professionnelles.

Nous allons donc utiliser un cadre théorique fortement inspiré de la DADE, mais spécifique à l'analyse de pratiques de formations mettant en jeu l'utilisation d'un modèle scientifique scolaire. Ce cadre est composé de trois approches :

- une approche didactique, qui décrit les éléments de l'activité du formateur ;
- une approche ergonomique, qui décrit certains déterminants de l'activité du formateur ;
- une approche épistémologique, qui met en évidence les modèles scientifiques scolaires de l'énergie et leur articulation avec les savoirs scientifiques et didactiques.

Nous précisons ici que les trois approches didactique, épistémologique et ergonomique ne seront pas présentées lors de nos analyses comme des blocs distincts et indépendants les uns des autres.

Les trois prochaines sections sont consacrées à l'explicitation de ces approches. Bien que nous l'ayons composé spécifiquement pour l'analyse de pratiques *de formation*, nous montrerons que ce cadre reste pertinent pour l'analyse de modèles scientifiques scolaires de l'énergie proposés par les autres acteurs institutionnels auxquels nous nous intéressons.

5.2. Approche épistémologique

L'approche épistémologique de notre cadre théorique doit permettre d'une part d'analyser des chaînes énergétiques et des modèles scientifiques scolaires de l'énergie, et d'autre part d'étudier des pratiques professionnelles liées à l'enseignement de l'énergie qui reposent sur l'utilisation de ces modèles.

Description générale

Comme en témoigne la première partie de ce manuscrit, notre travail de recherche présente un ancrage épistémologique fort. La Figure 31 met en évidence les liens entre la théorie scientifique de l'énergie, les modèles scientifiques – scolaires ou non – de l'énergie et la recherche en didactique. Sur cette figure, nous avons fait le choix de séparer les chaînes énergétiques des modèles scientifiques scolaires de l'énergie, bien qu'elles soient intégrées à ces modèles : cette représentation éclatée est un artifice qui nous permet d'interroger la cohérence entre une chaîne énergétique et le modèle dont elle est supposée être une représentation (voir chap.6, QR2).

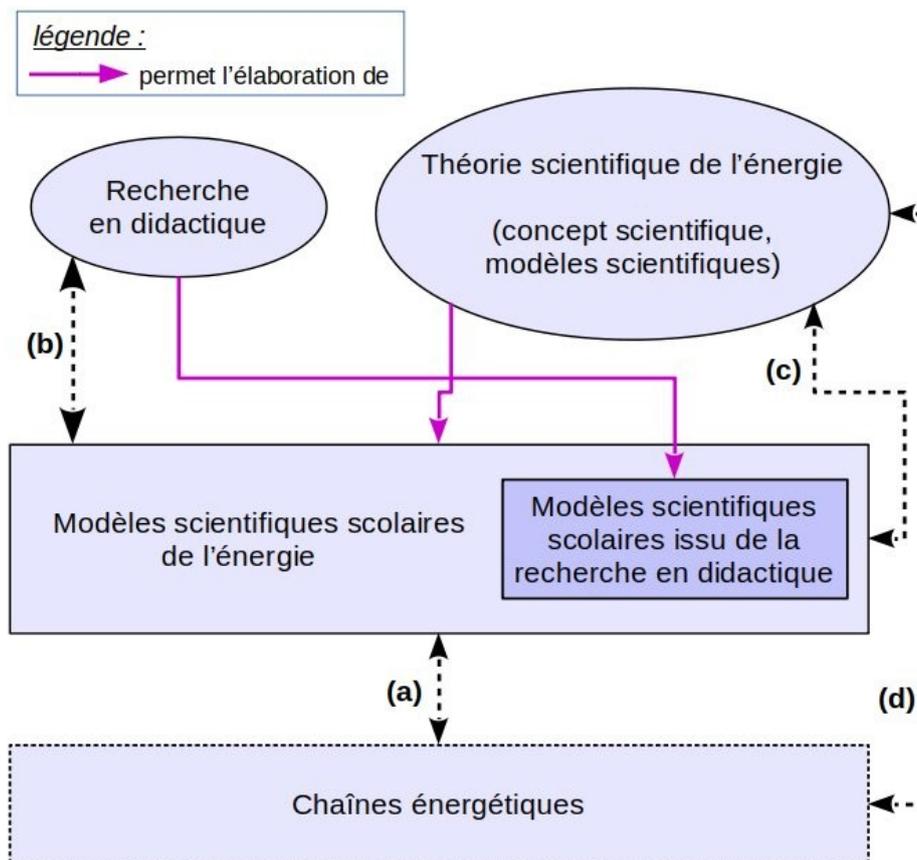


Figure 31: relations entre théorie scientifique de l'énergie, modèles scientifiques scolaires de l'énergie et recherche en didactique

Dans les chapitres précédents, nous avons :

- décrit la théorie scientifique de l'énergie, composée du concept scientifique de l'énergie et des modèles scientifiques qui lui sont associés (chap.2) ;
- présenté les principaux résultats issus de la recherche en didactique relatifs à l'enseignement de l'énergie, ce qui nous a donné les lignes directrices d'un ou plusieurs modèles scientifiques scolaires de l'énergie cohérents avec la recherche en didactique (chap.3) ;
- discuté des chaînes énergétiques proposées par la recherche en didactique (chap.4).

Certaines questions restent toutefois en suspens, notamment concernant les relations représentées en pointillés sur la Figure 31 :

- (a) Quels aspects des modèles scientifiques scolaires de l'énergie peuvent être et sont représentés par des chaînes énergétiques ?
- (b) Dans quelle mesure un modèle scientifique scolaire prend-il en compte les résultats de la recherche en didactique relatifs à l'enseignement de l'énergie ?
- (c) Dans quelle mesure les modèles scientifiques scolaires de l'énergie sont-ils cohérents avec la théorie scientifique de l'énergie ?
- (d) Dans quelle mesure les chaînes énergétiques sont-elles cohérentes avec la théorie scientifique de l'énergie ?

Bien qu'elle soit à l'interface entre une approche épistémologique et une approche didactique, nous pouvons ajouter à ces questions celle de l'utilisation des chaînes énergétiques : de quelle

manière peut-on se servir d'une chaîne énergétique ? quels types de tâches peut-elle permettre de résoudre ?

Pour pouvoir discuter de ces questions, nous nous plaçons dans un cadre de modélisation (Tiberghien et Vince, 2005 ; Sensevy *et al.*, 2008 ; Veillard *et al.*, 2011), dont nous allons justifier la pertinence dans le cadre de notre travail.

La théorie des deux mondes, un cadre de modélisation (Tiberghien et Vince, 2005)

Selon Martinand, la modélisation, c'est « la construction, l'adaptation, l'utilisation des modèles » (1998, p.1), qui prennent en charge la question des rapports entre concret et abstrait, de l'articulation entre expérimental et théorique.

Dans notre travail, nous allons utiliser le cadre de la modélisation décrit initialement en didactique de la physique par Gaidioz et Tiberghien (2003), puis développé et utilisé dans ne nombreux articles (voir par exemple Tiberghien et Vince, 2005 ; Sensevy *et al.*, 2008 ; Veillard *et al.*, 2011) sous le nom de « théorie des deux mondes ». Il opère une distinction entre le monde des théories et des modèles (où se trouvent concepts et relations entre concepts) et le monde des objets et des événements (un monde du concret, de l'expérience, qui décrit des relations entre objets et/ou événements).

« Modéliser », c'est créer du lien entre les deux mondes (Figure 32, relations a et b), activité reconnue comme particulièrement difficile dans un contexte d'enseignement et d'apprentissage scientifique (Tiberghien et Vince, 2005). L'utilisation d'un modèle scientifique scolaire peut aussi mettre en jeu un travail au sein du monde des théories et des modèles sans passage par le monde des objets et événements (Figure 32, relation d), voire un travail restreint au monde des objets et des événements (Figure 32, relation c).

Ce cadre nous permettra à la fois de mettre en évidence de façon simple les règles de fonctionnement de modèles scientifiques scolaires (comment doit-on passer d'un monde à l'autre ? quelles relations existe-t-il entre éléments d'un même monde au sein de la théorie considérée ? etc.), et de caractériser l'activité de modélisation que nécessite la résolution d'une tâche⁶⁰ (dans quelle mesure la tâche implique-t-elle de passer d'un monde à l'autre ? sa résolution nécessite-t-elle de faire des allers et retours entre les deux mondes ? peut-elle être résolue en restant dans l'un des deux mondes ?)

60 En répondant à ce type de questions, nous mobiliserons à la fois une approche épistémologique et une approche didactique.

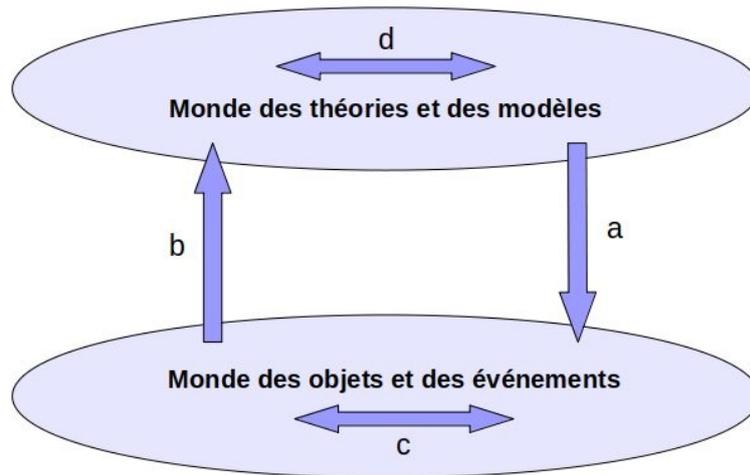


Figure 32: représentation simplifiée de la théorie des deux mondes (à partir de Tiberghien et Vince, 2005)

Comme l'illustre la Figure 33, dès 2005, Tiberghien et Vince proposent de distinguer, pour chacun des deux mondes, ce qui concerne la vie quotidienne de ce qui concerne la physique (par exemple, une justification erronée liée à une conception basée sur un raisonnement linéaire causal se situe dans le monde des théories et des modèles de la vie quotidienne, alors qu'une justification rigoureuse basée sur des théories valides de la physique appartient au monde des théories et des modèles de la physique).

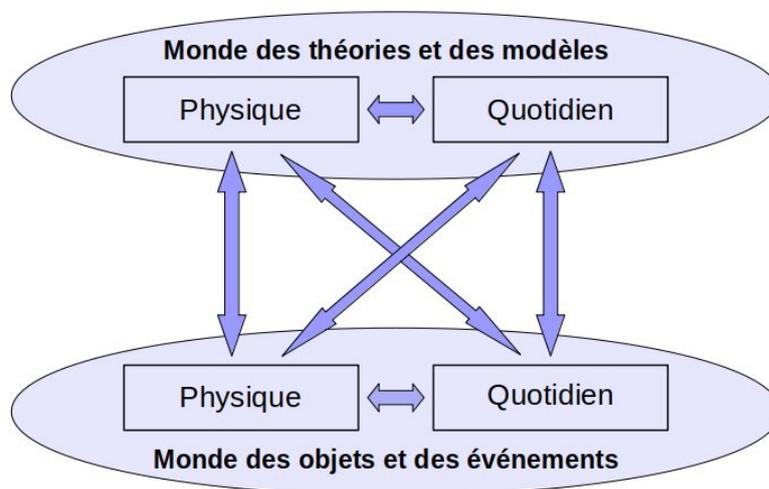


Figure 33: relations entre les deux mondes (Veillard et al., 2011, figure 2 : « Représentation de la théorie spécifique des deux mondes »)

Nous avons déjà mentionné (chap.1) que les modèles scientifiques scolaires sont à l'interface entre des modèles scientifiques et des modèles « primitifs », déjà mobilisés par les élèves (Kermen, 2018, p.25). Pour cette raison, l'utilisation d'un cadre qui opère une distinction entre ce qui relève

de la science et ce qui relève de la vie quotidienne nous semble particulièrement pertinente. Nous nous en servons en particulier pour analyser le discours associé à l'utilisation de modèles scolaires de l'énergie, ce qui nous permettra de déterminer dans quelle mesure les modèles pris en considération peuvent être qualifiés de *scientifiques*.

5.3. Approche didactique

Nous allons être amenée à analyser des pratiques de formateurs (déclarées et effectives). Pour décrire ces pratiques, nous adoptons une approche didactique cohérente avec celle qui est proposée dans la DADE (Robert et Rogalski, 2002), adaptée à un contexte de formation.

L'approche didactique que propose la DADE décrit les éléments de l'activité enseignante selon deux composantes : une composante *cognitive*, qui recouvre les tâches prescrites par l'enseignant, et une composante *médiative*, qui traduit la manière dont les tâches se déroulent pendant la séance, composée de l'organisation du travail en classe, de l'étayage et du discours de l'enseignant (Kermen, 2018).

Dans un contexte de formation, l'approche didactique est de deux natures : d'une part, celle qui décrit les éléments de l'activité du formateur (pratique effective de formation), et d'autre part, celle qui décrit les éléments de l'activité de l'enseignant en classe, souhaitée par le formateur (pratique conseillée d'enseignement et/ou déclarée, si le formateur est également enseignant).

Pour décrire la composante cognitive des pratiques, nous évaluerons la *complexité*⁶¹ des tâches proposées en référence aux travaux de Kermen et Barroso (2013, p.95) : « une tâche simple correspond à la mise en application directe d'une connaissance spécifiée dans l'énoncé tandis qu'une tâche complexe correspond à un raisonnement en plusieurs étapes (non explicitées) ou à faire des choix de procédures ou de connaissances à activer ».

Pour décrire la composante médiative des pratiques, nous exposerons la manière dont le formateur guide les enseignants dans une activité effective (conseils, temps laissé, réaction aux erreurs, etc.) et les propositions d'accompagnement à l'activité de leurs élèves en classe (composante médiative des pratiques conseillées et déclarées).

Nous utiliserons cette approche didactique pour déterminer la manière dont circule le savoir lié à l'enseignement et à l'apprentissage de l'énergie pendant une séance de formation, et la manière dont le savoir a vocation à être enseigné, en particulier selon les formateurs (analyse de pratiques exclusivement déclarées) et les autres institutions considérées (analyse de documents).

L'activité du formateur et les tâches proposées par l'ensemble des institutions pourront également être décrites et analysées sous l'angle de la modélisation.

5.4. Approche ergonomique

L'approche ergonomique nous permet d'analyser tout ce qui peut influencer les pratiques, mais qui ne relève ni du savoir relatif à l'énergie, que nous analysons sous un angle épistémologique, ni de l'enseignement et de l'apprentissage, que nous analysons sous un angle didactique.

61 Bien que Kermen et Barroso parlent de « nature » de la tâche, nous avons choisi d'utiliser le terme « complexité » pour éviter toute confusion avec la catégorisation des tâches que nous proposons en regard de la modélisation.

Adaptation de l'approche ergonomique proposée dans la DADE

L'approche ergonomique proposée dans la DADE (Robert et Rogalski, 2002 ; Robert, 2007) permet de mettre en évidence les déterminants de l'activité enseignante en les présentant selon trois composantes : une composante *personnelle*, une composante *institutionnelle*, et une composante *sociale*. Comme le précise Robert, ces composantes ne sont pas nécessairement « observables en classe » (Robert, 2007, p.278), mais peuvent être repérées à l'extérieur de la classe, par exemple lors d'entretiens préliminaires ou de confrontation. Elles sont assimilées à des contraintes.

Nous reprenons la description des visées de ces composantes faite par Kermen et Barroso en 2013 en didactique de la chimie, aisément transposables à la didactique de la physique :

« Les (...) composantes institutionnelle, sociale et personnelle (...) visent à déterminer :

- pour la composante institutionnelle, comment l'enseignant prend en compte les programmes et les ressources imposées (en chimie, sont en jeu, par exemple, la disponibilité du matériel et des espèces chimiques ainsi que leur absence de dangerosité) ;
- pour la composante sociale, comment il compose avec les choix collectifs de ses collègues dans l'établissement, les habitudes professionnelles des enseignants de physique-chimie (...) et le milieu social de ses élèves ;
- pour la composante personnelle, comment s'expriment ses représentations sur la chimie, ses convictions personnelles sur l'enseignement de la chimie notamment ; quel est l'impact de son histoire personnelle sur son travail. » (Kermen et Barroso, 2013, p.94, en référence à Robert, 2012)

Puisque nous nous intéressons aux déterminants de l'activité de formateurs, et non d'enseignants, nous devons adapter cette approche en apportant des modifications au contenu de ces composantes :

- la composante *institutionnelle* des déterminants de l'activité du formateur détermine comment il prend en compte les ressources dont il dispose pendant la séance de formation, les ressources dont disposent les enseignants-stagiaires dans leurs établissements scolaires, les contraintes institutionnelles liées à la formation (durée, contenu imposé...), les contraintes institutionnelles liées à l'enseignement (programmes, contraintes de temps, etc.) ;

- la composante *sociale* des déterminants de l'activité du formateur détermine comment il prend en compte les habitudes professionnelles de formation, les habitudes professionnelles d'enseignement, la typologie des enseignants-stagiaires, la typologie des élèves des enseignants-stagiaires et des formateurs, ainsi que ce qui est lié au collectif de travail (à l'ensemble des formateurs d'une même formation, à l'organisme qui propose les formations, etc.) ;

- la composante *personnelle* des déterminants des pratiques du formateur détermine comment s'expriment ses connaissances professionnelles, ses conceptions et son expérience *de formateur* – et, éventuellement, d'enseignant.

Si les composantes institutionnelle et sociale peuvent être facilement objectivées (horaires, manuels, programmes...), certains aspects de la composante personnelle – et, en particulier, les connaissances professionnelles des formateurs – nécessitent l'utilisation d'un cadre d'analyse formel pour pouvoir être décrits avec précision.

Cadre d'analyse pour les connaissances professionnelles des formateurs

À notre connaissance, il n'existe pas de cadre d'analyse spécifique pour les connaissances professionnelles de formateurs d'enseignants.

Pour construire notre cadre, nous sommes partie des travaux de Shulman (1986, 1987, 2007, 2015). Il sépare les connaissances professionnelles des enseignants en deux catégories, selon qu'elles relèvent ou non des contenus à enseigner. Pour celles qui sont liées au contenu, il propose trois sous-catégories : les connaissances disciplinaires du contenu (*subject matter content knowledge*, SMK), les connaissances pédagogiques liées au contenu (*pedagogical content knowledge*, PCK), et les connaissances curriculaires (*curricular knowledge*, CK) (Shulman, 2007, p.104).

Les connaissances disciplinaires du contenu sont spécifiques au domaine disciplinaire considéré, et « représente[nt] l'ensemble de règles pouvant déterminer ce qu'il est légitime de dire dans un domaine disciplinaire et ce qui "enfreint" les règles » (Shulman, 2007, p.104). Dans notre travail, elles seront analysées principalement à travers une approche épistémologique, que nous avons décrite précédemment.

La composante personnelle des pratiques des formateurs sera essentiellement composée des connaissances pédagogiques liées au contenu (PCK), ainsi que d'autres connaissances, qui ne relèvent pas de contenus disciplinaires, pour lesquelles Shulman propose quatre sous-catégories :

- « – les connaissances pédagogiques générales, en relation avec la gestion de la classe et des activités des élèves tant dans ses aspects organisationnels, temporels que matériels ;
- les connaissances sur les élèves, la classe et leurs caractéristiques ;
- les connaissances sur le contexte de l'établissement, de la classe ;
- les connaissances sur les buts et les valeurs de l'éducation. » (Shulman, 1986, 1987, dans Bécu-Robinault, 2007).

Les connaissances sur les élèves, la classe et leurs caractéristiques ainsi que les connaissances sur le contexte de l'établissement et de la classe ne seront, *a priori*, pas mobilisées par les formateurs dans un contexte de formation.

Dans notre cadre d'analyse, les connaissances professionnelles des formateurs seront donc essentiellement composées de :

- leurs PCK ;
- leurs connaissances pédagogiques générales telles que décrites ci-dessus (en relation avec la gestion de la classe et des activités des élèves tant dans ses aspects organisationnels, temporels que matériels) ;
- leurs connaissances pédagogiques générales liées à la formation ;
- leurs connaissances sur les buts et les valeurs de l'éducation ;
- leurs connaissances curriculaires.

Pour décrire les PCK, nous nous référons à la catégorisation proposée par Magnusson et ses coauteurs (1999), qui distinguent les connaissances sur les stratégies d'enseignement, les connaissances sur l'évaluation, les connaissances sur les difficultés des élèves et les orientations pour l'enseignement des sciences.

Dans un contexte de formation, il nous faut nous intéresser également aux connaissances sur les stratégies de formation et aux connaissances sur les difficultés des enseignants – qui peuvent être liées au contenu disciplinaire ou non.

Nous aboutissons ainsi à la décomposition des connaissances professionnelles des formateurs suivante :

- connaissances sur les stratégies d'enseignement à l'énergie ;
- connaissances sur les stratégies d'enseignement non disciplinaires ;
- connaissances sur les stratégies de formation à l'énergie ;
- connaissances sur les stratégies de formation non disciplinaires ;
- connaissances sur les difficultés des élèves (essentiellement disciplinaires) ;
- connaissances sur les difficultés des enseignants (essentiellement disciplinaires) ;
- connaissances sur l'évaluation ;
- connaissances curriculaires ;
- buts et valeurs de l'éducation et de la formation ;
- orientations pour l'enseignement des sciences.

Nous avons proposé une large liste de connaissances professionnelles qui peuvent être mobilisées par les formateurs dans le cadre de leur activité de formation à l'énergie, dans une optique d'exhaustivité. Cependant, dans un contexte de formation disciplinaire – à l'enseignement de l'énergie –, nous nous attendons à ce que ces catégories de connaissances soient plus ou moins mobilisées par les formateurs, et, par exemple, à trouver davantage de connaissances liées à l'enseignement de l'énergie et aux difficultés des élèves qu'à l'évaluation.

Par ailleurs, nous avons choisi de ne pas marquer de séparation franche entre de qui relève du disciplinaire et du non disciplinaire (au cours de l'analyse de nos entretiens, nous remarquerons que certaines connaissances professionnelles des formateurs mises en évidence peuvent être interprétées comme liées au contenu disciplinaire ou non).

5.5. Relations entre les approches et leurs composantes

Nous avons choisi d'effectuer notre travail de recherche selon trois approches épistémologique, didactique et ergonomique. Avant de conclure ce chapitre, nous décrivons les relations existantes (représentées en traits pleins sur la Figure 34) ou susceptibles d'exister (représentées en pointillés sur la Figure 34) entre les composantes de ces approches, en particulier dans le cas de l'analyse de pratiques de formation.

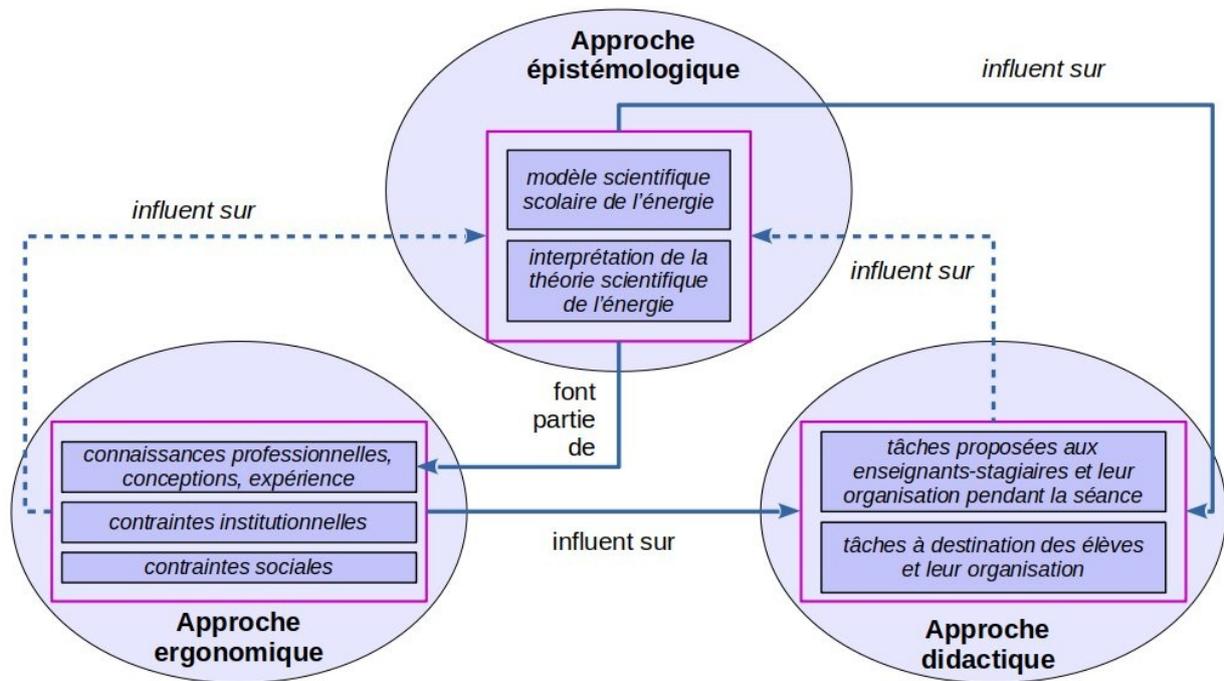


Figure 34: relations entre les trois approches épistémologique, didactique et ergonomique et leurs composantes

Puisque ce cadre s'inspire de la DADE, nous partons du principe que les contraintes de nature institutionnelle, sociale et personnelle que nous mettrons en évidence influent sur les pratiques des formateurs.

Nous savons également que le modèle scientifique scolaire choisi par le formateur (consciemment ou non) fait partie de ses connaissances professionnelles, tout comme son interprétation du concept et des modèles scientifiques de l'énergie.

Cependant, nous postulons que ces connaissances spécifiques liées à l'énergie résultent aussi de choix qui peuvent être décrits par une approche ergonomique – c'est d'ailleurs une des raisons pour lesquelles nous étudions séparément ces connaissances spécifiques des autres connaissances des formateurs.

Enfin, nous envisageons la possibilité que l'utilisation didactique d'un modèle scientifique scolaire de l'énergie puisse modifier ce modèle. Ceci pourrait expliquer, par exemple, le passage d'un modèle scientifique scolaire *initial*, choisi consciemment par le formateur – ou l'enseignant –, à un modèle scientifique scolaire *appliqué*, distinct du modèle initial.

5.6. Conclusion

Nous proposons une adaptation de la double approche didactique et ergonomique (Robert et Rogalski, 2002) pour l'analyse de formations mettant en jeu un modèle scientifique scolaire particulier (dans notre cas, celui de l'énergie).

Pour ce faire, nous avons conçu un cadre général qui repose sur une triple approche didactique, ergonomique et épistémologique. Le cadre de la modélisation dit de la « théorie des deux mondes » (Tiberghien et Vince, 2005) nous permettra de mettre en évidence et de caractériser certains jeux

didactiques qui se dérouleront pendant la séance de formation, et d'analyser le discours des formateurs relatif à une activité de modélisation.

Par une approche ergonomique, nous identifierons les déterminants institutionnels, sociaux et personnels des formateurs susceptibles d'expliquer leurs choix et logiques d'action. Leurs connaissances professionnelles seront présentées à travers une classification inspirée des travaux de Shulman (1986, 1987) et de Magnusson *et al.* (1999).

Cette triple approche, que nous avons conçue initialement pour l'analyse de formations, soutendra l'ensemble de notre travail de recherche, qui comportera également une analyse de documents institutionnels (programme, documents d'accompagnement, manuels scolaires), faite sous un angle épistémologique et didactique, dans un cadre de modélisation.

6. Questions de recherche

Avant d'énoncer nos questions de recherche, nous rappelons le contexte dans lequel s'inscrit notre travail. Le nouveau programme de physique-chimie pour le Cycle 4 (M.E.N.E.S.R., 2015) introduit l'énergie comme thème d'enseignement à part entière.

Des entretiens exploratoires avec des enseignants ont mis en évidence une grande diversité des approches pour ce thème et, en particulier, pour la représentation des phénomènes énergétiques par des chaînes énergétiques et leur utilisation. Des discussions avec des éditeurs et des rédacteurs de manuels scolaires laissent entendre que cette multiplicité des approches n'est pas spécifique aux enseignants, mais touche aussi ce que ces derniers peuvent considérer comme des institutions, et dont les choix relatifs à l'enseignement de l'énergie peuvent être mis en évidence par une analyse de programme, de manuels, de documents d'accompagnement officiels (ceux qui figurent sur le site Internet Eduscol⁶²), mais aussi de pratiques – déclarées ou effectives – de formateurs académiques.

L'enseignement et l'apprentissage de l'énergie ont donné lieu à de nombreuses recherches en didactique depuis les années 1970, mettant en évidence certaines difficultés dans l'appropriation de cette grandeur physique particulièrement abstraite, difficile à comprendre et à enseigner. Nous n'avons pas pu identifier de modèle scientifique scolaire clair qui favorise les apprentissages, en particulier pour des élèves de collège. Nous avons montré que deux catégories de chaînes énergétiques – les chaînes *pendant* et les chaînes *avant-après* – coexistent en didactique et permettent une représentation de différentes caractéristiques de l'énergie.

Tout ceci nous conduit à poser trois questions de recherche. Les deux premières sont larges, dans le sens où elles concernent l'ensemble des institutions que nous avons choisi de prendre en considération. La troisième interroge plus particulièrement la formation continue à l'enseignement de l'énergie en France métropolitaine.

QR1 – Modèles scientifiques scolaires de l'énergie portés par les institutions

Nous allons chercher à décrire le plus précisément possible les modèles scientifiques scolaires de l'énergie proposés par les différents acteurs institutionnels pris en considération.

Pour chaque modèle, nous mettrons en évidence quelles caractéristiques de l'énergie sont mises en avant et quelles sont celles qui sont occultées. Nous relèverons les éléments spécifiques qui composent ces modèles – entre autres, s'ils comportent des chaînes énergétiques – et les règles de fonctionnement qui les régissent. Nous tenterons également d'identifier leurs limites et leur domaine de validité.

Une formulation synthétique de notre première question de recherche est :

QR1 : Quels sont les modèles scientifiques scolaires de l'énergie proposés par les différentes institutions ?

62 <https://eduscol.education.fr>

Ces modèles seront décrits essentiellement par une approche épistémologique, mais aussi par une approche didactique (en particulier, dans le cas de leur utilisation réelle ou déclarée en séance de formation).

Nous tenons à souligner ici que notre démarche est exploratoire et descriptive : il ne s'agit pas de désigner de « bons » et de « mauvais » modèles⁶³, mais plutôt de les identifier, de les caractériser, et de mettre certains de leurs aspects en regard des résultats et des propositions issues de la recherche en didactique. Nous verrons s'il existe des invariants, partagés par l'ensemble des modèles ou par les modèles proposés au sein d'un même bloc institutionnel (par exemple : entre les différents manuels scolaires ou entre les documents d'accompagnement).

Si les documents institutionnels que nous allons analyser ne présentent pas, de façon explicite, les règles de fonctionnement et les caractéristiques des modèles choisis, nous devons les déduire des tâches qu'ils proposent, des caractéristiques et des éléments spécifiques qu'ils attribuent au concept scolaire d'énergie. Pour répondre à notre première question de recherche, nous serons donc amenée à reconstituer des modèles et à inférer leurs règles de fonctionnement.

Nous tenterons aussi (voir ci-après, QR2) de déterminer dans quelle mesure les chaînes énergétiques proposées par les différents acteurs institutionnels sont cohérentes avec les modèles qu'ils promeuvent, dont elles sont présentées comme des représentations.

QR2 – Chaînes énergétiques promues par les institutions

Bien qu'elles fassent partie *a priori* des modèles scientifiques scolaires mentionnés dans la question précédente, nous avons choisi de consacrer une question de recherche à la caractérisation et au fonctionnement des chaînes énergétiques promues par les institutions, ce qui nous conduira à déterminer dans quelle mesure elles sont une représentation cohérente du modèle scientifique scolaire de l'énergie auquel elles se rapportent – nous interrogeons le lien (a) de la Figure 31.

Notre deuxième question de recherche est composée de plusieurs sous-questions :

QR2 : Quels sont les chaînes énergétiques promues par les différentes institutions ? Quelles propriétés de l'énergie représentent-elles et ne permettent-elles pas de représenter ? Selon l'institution considérée, quels types de tâches doivent-elles permettre de résoudre ? Ces chaînes sont-elles cohérentes avec les modèles dont elles sont *a priori* des représentations ?

L'analyse des chaînes énergétiques se fera sous un angle épistémologique (caractérisation des chaînes) et didactique (utilisation des chaînes).

QR3 – Logiques d'action des formateurs

Les formateurs académiques qui dispensent des formations relatives à l'enseignement de l'énergie à destination d'enseignants de collège forment une institution particulière dans cette recherche, puisque ce sont les seuls acteurs institutionnels que nous avons pu rencontrer pendant notre travail de thèse dans le cadre d'entretiens, de réunions de travail et de séances de formation.

63 Et ce d'autant plus qu'à notre connaissance, il n'existe pas d'étude qui mette en évidence l'impact de l'utilisation d'un modèle scientifique scolaire de l'énergie particulier sur les apprentissages.

Après avoir mis en évidence les modèles scientifiques scolaires de l'énergie et les chaînes énergétiques qu'ils promeuvent, nous avons souhaité comprendre les raisons de leurs choix, ce qui nous a amenée à formuler notre troisième question de recherche :

QR3a : Pour quelles raisons les formateurs académiques privilégient-ils un certain modèle de l'énergie ainsi que l'usage – ou non – de certaines chaînes énergétiques ?

QR3b : Quelles sont les raisons qui expliquent les choix didactiques de formation à l'énergie effectués par les formateurs ?

Pour répondre à cette question, nous interrogerons les relations entre les trois approches épistémologique, didactique et ergonomique et leurs composantes (représentées par des flèches pleines sur la Figure 34).

Nous mettrons en évidence les logiques d'actions réelles ou déclarées des formateurs, en identifiant les contraintes qui justifient leurs choix de modèle, de formation, voire d'enseignement.

7. Méthodologie

Dans ce chapitre, nous exposons la méthodologie que nous avons mise en œuvre afin de répondre à l'ensemble de nos questions de recherche. Nous commençons par exposer la manière dont nous avons constitué notre corpus, puis nous expliquons la méthodologie mise en œuvre pour analyser l'ensemble de nos données.

7.1. Constitution du corpus

Notre corpus est essentiellement constitué de documents institutionnels et de transcriptions du discours de formateurs académiques recueillis au cours d'entretiens et au cours de stages de formation.

Documents institutionnels officiels

Documents pris en compte

Dans notre travail, nous analysons les documents institutionnels liés à l'enseignement de l'énergie pour le Cycle 4 suivants :

- le programme de physique-chimie de Cycle 4 (M.E.N.E.S.R., 2015) ;
- les documents d'accompagnement Eduscol pour l'enseignement de Cycle 4, en ligne à l'automne 2020 sur le site <https://eduscol.education.fr> ;
- les manuels scolaires de Cycle 4 (éditions 2016-2017) dont nous disposons, que nous désignerons dans la suite par le nom de leurs éditions (nous distinguons les deux manuels « Bordas » en ajoutant le nom de la collection) :
 - « Microméga Physique Chimie Le manuel de cycle », par Alibert *et al.* (2017), éditions Hatier ;
 - « Physique Chimie Cycle 4 », par Amauger *et al.* (2017), éditions Nathan ;
 - « Physique Chimie Cycle 4 », par Barde *et al.* (2017), éditions Hachette Éducation ;
 - « Cycle 4 Physique Chimie », par Begin *et al.* (2017), éditions Magnard ;
 - « Collection Regaud-Vento Physique Chimie Cycle 4 », par Bélanger *et al.* (2017), éditions Bordas-Regaud-Vento ;
 - « Physique Chimie Manuel unique Cycle 4 », par Blanc *et al.* (2017), éditions lelivrescolaire.fr ;
 - « Espace Physique Chimie Cycle 4 », par Brun *et al.* (2017), éditions Bordas-Espace.

Sélection des données

Nous avons utilisé l'ensemble du programme de physique-chimie de Cycle 4 afin de déterminer la place qu'y occupent l'énergie et les chaînes énergétiques. Nous nous sommes intéressée en particulier à la partie du programme qui concerne l'enseignement de l'énergie (« L'énergie et ses conversion ») afin d'identifier quel modèle scientifique scolaire de l'énergie y est proposé.

Nous avons recensé les documents Eduscol pour le Cycle 4 en ligne relatifs à l'enseignement de l'énergie.

Il s'agit de :

- Un document d'aide à la construction d'une progression en physique-chimie au Cycle 4 – annexe C1 (M.E.N.E.S.R., 2016f) ;
- Un document de pistes pour la construction d'une progression sur le thème *L'énergie et ses conversions* – annexe C2 (M.E.N.E.S.R., 2016a) ;
- Une proposition d'activité intitulée « Quelle bouilloire chois-tu ? Pourquoi ? » – annexe C3 (M.E.N.E.S.R., 2016c) ;
- Une proposition d'activité intitulée « Sur un circuit automobile, quelle voiture pourra atteindre la vitesse de 320 km/h avant la moto ? » – annexe C4 (M.E.N.E.S.R., 2016e) ;
- Une proposition d'activité¹³ intitulée « Quel volume de boisson au cola compense les dépenses d'énergie d'un cycliste faisant l'ascension du Mont Ventoux ? » – annexe C5 (M.E.N.E.S.R., 2016b).

Nous reproduisons ces documents en annexes C.

Dans les manuels de Cycle, nous nous sommes intéressée aux parties de cours des chapitres faisant explicitement référence à l'énergie. Nous avons également relevé l'ensemble des chaînes énergétiques qui figurent dans ces manuels, et sélectionné l'ensemble des exercices proposant ou mentionnant l'utilisation ou l'élaboration d'une chaîne énergétique ainsi que les fiches-méthode associées à la lecture, à l'utilisation ou à l'élaboration d'une chaîne énergétique.

Formation continue à l'énergie

Nous avons voulu dresser une cartographie le plus exhaustive possible des propositions de stage de formation continue académiques à destination d'enseignants du secondaire relatives à l'enseignement de l'énergie au Cycle 4 en France métropolitaine pour l'année 2021-2022. Pour ce faire, nous avons lu l'ensemble des Plans Académiques de Formation (PAF) que nous avons trouvés en ligne afin d'y repérer les formations concernant l'énergie au collège (ou à l'ensemble collège-lycée). Nous avons tenté de contacter directement les académies pour lesquelles nous ne trouvions pas de PAF accessible.

Pendant l'année scolaire 2021-2022, sur les 25 académies de France métropolitaine :

- 4 n'ont pas pu être incluses dans notre travail de recherche (elles ne proposaient pas de PAF en ligne et n'ont pas répondu à nos sollicitations par courriel) ;
- 14 ne proposaient pas d'offre de formation continue à l'enseignement de l'énergie ;
- 7 proposaient des stages de formation continue à l'enseignement de l'énergie. Deux d'entre elles proposaient un même stage, ce qui porte à 6 le nombre total de stages de formation pris en compte⁶⁴. Les stages de formation pris en considération dans notre travail seront numérotés F1, F2, F3, F4, F5 et F6.

Nous avons cherché à contacter l'ensemble des formateurs animant ces formations, et nous avons réalisé des entretiens téléphoniques semi-directifs avec douze formateurs volontaires, d'une durée comprise entre 30 minutes et une heure.

Le protocole d'entretien à destination des formateurs (en annexe B) se compose de trois parties. La première comporte des questions générales au sujet du formateur et en particulier de son

64 Afin de préserver l'anonymat des formateurs, nous ne précisons pas de quel stage de formation il s'agit.

parcours professionnel en tant que formateur et/ou enseignant. La deuxième s'intéresse au stage de formation dans lequel il intervient. Pendant la dernière partie, nous avons invité chaque formateur à évoquer le concept d'énergie sous un angle scientifique.

Au cours de ces entretiens, nous avons choisi de ne pas évoquer les chaînes énergétiques. Dès lors qu'un formateur les a évoquées par lui-même, nous lui avons demandé de préciser ce qu'il entendait par « chaîne énergétique » – quelle(s) forme(s), quelle(s) fonction(s), quelle(s) utilisation(s).

Rencontres préparatoires et séances de formation (formations F1 et F2)

Nous avons contacté les formateurs des stages de formation F1 et F2 dès la fin de notre première année de thèse⁶⁵ ; ils nous ont exposé leur manière de former à l'énergie, brièvement et de façon informelle, en mettant en avant certaines caractéristiques du modèle scientifique scolaire de l'énergie qu'ils proposent en formation.

Nous leur avons donc demandé la possibilité d'assister aux séances de formation et aux rencontres préparatoires qui les ont précédées, ce qu'ils ont accepté.

Formation F1

Les trois formateurs qui ont animé la séance de formation F1 nous ont permis d'assister à la rencontre pendant laquelle ils ont finalisé la préparation de cette séance (année scolaire 2021-2022⁶⁶). Elle s'est déroulée en visio en décembre 2021 et a été enregistrée sur notre ordinateur personnel à l'aide du logiciel SimpleScreenRecorder© (version 0.3.11). L'enregistrement audio a été doublé par l'utilisation d'un dictaphone.

Les formateurs nous ont également permis d'assister à la journée de formation en elle-même, qui a eu lieu en avril 2022. Les trois formateurs et 14 enseignants-stagiaires y ont participé ; elle s'est déroulée dans une salle de travaux pratiques d'un collège de banlieue. Elle a été enregistrée dans son intégralité par deux caméras en plan fixe, une en fond de salle, orientée vers le tableau (vue d'ensemble de la formation), l'autre, proche du bureau, permettant une observation plus fine des formateurs. Nous avons pris en photo la plupart des chaînes énergétiques qui ont été tracées au tableau, afin d'en avoir une image plus nette que celles issues des vidéos. Les documents projetés et distribués pendant la séance de formation font également partie de notre corpus.

Nous avons écouté les enregistrements de la rencontre préparatoire et de la séance de formation, que nous avons découpés en épisodes, afin de sélectionner ceux qui concernaient le modèle scientifique scolaire de l'énergie proposé par les formateurs (dont les chaînes énergétiques), les tâches proposées aux enseignants-stagiaires et leur correction, ainsi que les tâches proposées pour l'enseignement en classe. La chronogénèse de la rencontre préparatoire se trouve au Tableau 13 ; celle de la séance de formation figure en annexe D. Les épisodes sélectionnés ont été transcrits selon les normes Valibel, en ajoutant des indications visuelles (gestes des formateurs, notamment lors du tracé et de l'utilisation de chaînes énergétiques).

65 Notre problématique et nos questions de recherche étaient en cours de construction, et nous n'envisagions pas encore de nous focaliser sur la formation continue à l'énergie. Les autres formateurs n'ont été contactés que par la suite (en 2021-2022).

66 Nous aurions dû assister à la rencontre préparatoire et au stage de formation de l'année scolaire 2020-2021, qui ont été annulés du fait des restrictions sanitaires liées à la crise Covid-19.

Formation F2

Pendant l'année scolaire 2020-2021, le stage de formation F2 a eu lieu à distance, par une application de visioconférence. Certaines parties de ce stage se sont déroulées dans plusieurs salles virtuelles (travaux en petits groupes). Seules les parties communes (salle principale) de ces séances ont été enregistrées, sur notre ordinateur personnel, à l'aide du logiciel SimpleScreenRecorder© (version 0.3.11)⁶⁷.

Nous avons réalisé une chronogénèse de la formation (en annexe D), en repérant les différentes tâches proposées pendant le stage aux enseignants-stagiaires. Nous avons sélectionné en particulier les épisodes pendant lesquels les chaînes énergétiques et le concept scientifique scolaire d'énergie ont été évoqués, que nous avons transcrits selon les normes Valibel, en faisant des captures d'écran des chaînes énergétiques et de certains documents qui ont été partagés lors de ces rencontres.

7.2. Caractérisation des chaînes énergétiques et de leur utilisation

Caractérisation des chaînes énergétiques

Nous avons cherché à identifier les règles de construction et de fonctionnement de chacune des chaînes énergétiques de notre corpus et à déterminer quelles caractéristiques de l'énergie ces chaînes peuvent et ne peuvent pas représenter. Pour ce faire, nous utilisons les mêmes critères que ceux que nous avons utilisés pour analyser les chaînes énergétiques de la didactique (§4.5).

Lorsque les chaînes à analyser sont accompagnées de règles de fonctionnement (phrases explicatives, fiches-méthode), nous vérifions la cohérence entre les propriétés de l'énergie sur lesquelles elles s'appuient selon leurs auteurs et celles mises en évidence par notre analyse.

Analyse des tâches mettant en jeu des chaînes énergétiques

Au cours de notre travail, nous avons relevé un ensemble de tâches à destination d'élèves qui mettent en jeu des chaînes énergétiques. Nous les avons catégorisées selon qu'elles impliquent l'*élaboration* (ou *construction*), l'*utilisation*, ou la *modification* (ou *correction*) de chaînes énergétiques, en référence aux différentes fonctions qui sont associées aux modèles : représentation, explication, prévision et prédiction (voir §1.3).

Nous allons mettre en évidence les types de tâches que les chaînes doivent permettre de résoudre selon leurs auteurs. Pour cela, nous repérerons, tant dans les documents écrits (manuels, programmes, documents d'accompagnement, documents de formation) que dans les propos tenus par les formateurs, les consignes d'exercices, les exemples, les exercices résolus où il sera fait mention de chaînes énergétiques. Nous déterminons leur nature, leur complexité et les caractéristiques de l'énergie qu'elles mettent en jeu.

67 En 2020-2021, les quatre formateurs de la formation F2 nous ont permis d'assister à leurs trois rencontres préparatoires, de durées comprises entre 3h et 3h30. Des rencontres en groupes restreints de deux formateurs ont également eu lieu, auxquelles nous n'avons pas assisté et qui n'ont pas été enregistrées ; la préparation a été complétée par de nombreux échanges sur une application de messagerie de groupe, auxquels nous n'avons pas eu accès. Le stage de formation se déroulant sur deux journées à plus d'un mois d'intervalle l'une de l'autre, une rencontre supplémentaire de préparation à la seconde journée a également eu lieu. Ces données, à la fois très denses et très parcellaires, n'ont pas été analysées.

Nous distinguons la *nature* des tâches en lien avec la modélisation (Figure 32) :

- tâches T(a) : impliquent de passer du monde des théories et modèles vers le monde des objets et des événements ;
- tâches T(b) : impliquent de passer du monde des objets et des événements vers le monde des théories et modèles ;
- tâches T(c) : impliquent un travail au sein du monde des objets et des événements ;
- tâches T(d) : impliquent un travail au sein du monde des théories et modèles.

Le monde des théories et des modèles est ici essentiellement composé des caractéristiques attribuées à l'énergie dans un contexte d'enseignement, des éléments spécifiques liés au modèle scientifique scolaire de l'énergie, et des règles et lois que la physique attribue à l'énergie (théorie scientifique de l'énergie). Des lois et règles mathématiques peuvent également faire partie de ce monde.

Lorsque cela sera possible, nous estimerons le niveau de complexité des tâches proposées, c'est-à-dire leur degré de faisabilité par rapport aux connaissances supposées des élèves – ou des enseignants stagiaires – au moment où elles leur sont proposées.

7.3. Caractérisation des modèles scientifiques scolaires institutionnels de l'énergie

Les institutions et les formateurs dont nous analysons les pratiques font référence à un ou plusieurs modèles scientifiques scolaires de l'énergie le plus souvent implicites, que nous essayerons de reconstruire en nous appuyant sur des indices multiples : quelles sont les propriétés de l'énergie qu'ils intègrent ou non ? Quelles représentations sont proposées pour les phénomènes énergétiques ? Quelles sont les règles de fonctionnement des modèles et leurs spécificités ? Quelles en sont les limites d'utilisation ?

Propriétés de l'énergie et éléments spécifiques au modèle scientifique scolaire de l'énergie

Par une analyse lexicographique, nous allons relever les caractéristiques de l'énergie (voir Tableau 1) et les éléments spécifiques au modèle scientifique scolaire de l'énergie considéré qui sont mentionnés :

- dans le programme de Cycle 4 ;
- dans les documents d'accompagnement Eduscol sélectionnés ;
- dans les cours relatifs à l'énergie qui figurent dans les manuels de Cycle 4⁶⁸ ;
- dans le discours des formateurs et dans certains documents qu'ils ont mis à notre disposition.

Pour les stages de formation F1 et F2, nous relèverons les de l'énergie mentionnées lors de la construction et de la présentation de chaînes énergétiques

Lorsqu'une propriété de l'énergie est mentionnée sans être définie ou expliquée, on considère que c'est un indice faible de son appartenance au modèle scientifique scolaire de l'énergie considéré ; lorsqu'elle est définie ou explicitée, elle fait manifestement partie de ce modèle.

68 Nous ne prenons pas en compte les exercices, dans lesquels les propriétés de l'énergie ne peuvent être que difficilement caractérisées.

Les chaînes énergétiques, dont nous avons décrit l'analyse dans la section précédente, font également partie des modèles scientifiques scolaires de l'énergie pris en considération. Nous regarderons dans quelle mesure chaque chaîne est conforme au modèle dont elle est une représentation et quelle part de ce modèle (en particulier : quelles caractéristiques de l'énergie) elle représente.

Limites du modèle

Pour mettre en évidence les limites de chaque modèle, nous regardons le domaine de validité des éléments qui le constituent et, en particulier, des règles spécifiques à ce modèle scientifique scolaire. Si les limites du modèle sont clairement énoncées dans les documents et/ou les discours, nous les relèverons et vérifierons leur cohérence avec celles que nous aurons mises en évidence.

Nous relèverons aussi les limites des chaînes énergétiques, que nous comparerons à celles du modèle dont elles sont une représentation.

Les exemples choisis par les formateurs pour parler de l'énergie nous renseignent également sur le champ d'application de leur modèle, tout comme les types d'exercices proposés dans les manuels et les documents d'accompagnement. Bien qu'elles ne soient pas associées au modèle en tant que tel, ces limites nous renseignent sur la portée que leurs auteurs veulent lui donner.

7.4. Caractérisation des déterminants des formateurs

Pour déterminer les composantes institutionnelle, sociale et personnelle des pratiques des formateurs, nous nous appuyons sur l'analyse lexicographique de leurs propos (transcription des entretiens et, dans une moindre mesure, de certaines parties de la rencontre préparatoire et des stages de formation)⁶⁹. Il s'agit de caractériser l'environnement propre à chaque formateur et à chaque formation, de manière à mettre en évidence certains éléments de contexte pouvant expliquer leurs choix relatifs aux modèles scientifiques scolaires de l'énergie qu'ils utilisent et aux chaînes énergétiques qu'ils promeuvent.

Expérience professionnelle

Pour mettre en évidence l'expérience professionnelle de chaque formateur, nous relevons dans les entretiens ses réponses aux questions suivantes : est-il enseignant, a-t-il déjà enseigné ? Si oui, sur quels niveaux scolaires et combien de temps ? A-t-il suivi une formation pour être formateur ? Quelle est sa profession ? A-t-il exercé d'autres professions dans sa carrière ? Pour quelles raisons anime-t-il une formation relative à l'enseignement de l'énergie ?

Connaissances professionnelles des formateurs

Nous avons proposé une catégorisation pour l'ensemble des connaissances professionnelles des formateurs lors de la présentation de notre cadre théorique (§5.4). Pour déterminer ces connaissances professionnelles, nous relevons, dans le discours de chacun des formateurs (entretiens, rencontres préparatoires), des indices de :

69 Nous pourrions confirmer la présence ou l'importance de certaines contraintes en montrant qu'elles apparaissent également pendant la séance de formation, mais nous n'analyserons pas l'ensemble du discours tenu par les formateurs pendant la séance de formation par une approche ergonomique.

- ses connaissances sur les stratégies d'enseignement à l'énergie ;
- ses connaissances sur les stratégies d'enseignement non disciplinaires ;
- ses connaissances sur les stratégies de formation à l'énergie ;
- ses connaissances sur les stratégies de formation non disciplinaires ;
- ses connaissances sur les difficultés des élèves (essentiellement disciplinaires) ;
- ses connaissances sur les difficultés des enseignants (essentiellement disciplinaires) ;
- ses connaissances curriculaires ;
- ses connaissances sur l'évaluation ;
- ses buts et valeurs de l'éducation et de la formation ;
- ses orientations pour l'enseignement des sciences.

Nous n'avons pas relevé de connaissances curriculaires et de connaissances sur l'évaluation dans la plupart des entretiens – qui ne sont pas directement liées à nos questions de recherche. Certaines connaissances curriculaires des formateurs ont été catégorisées comme faisant partie de la composante institutionnelle plutôt que de la composante personnelle des déterminants de leurs pratiques – certaines connaissances curriculaires et contraintes institutionnelles étant difficiles à dissocier les unes des autres.

Composante institutionnelle

Pour connaître la composante institutionnelle des déterminants des formateurs, nous relèverons des indices relatifs à la formation qu'ils animent : est-elle adossée à un organisme de formation ou à une association particulière ? Si oui, quelles sont les règles de fonctionnement propres à cet organisme ou à cette association ? Quelles sont les contraintes matérielles et logistiques qui leur sont imposées, ou qu'ils estiment devoir respecter ?

Nous relèverons également les éventuelles contraintes institutionnelles liées à l'enseignement, telles que le programme scolaire, la durée des séances de cours (qui peuvent expliquer certains choix d'activités proposées à destination d'élèves), le matériel dont disposent habituellement les enseignants de physique-chimie de collège, etc.

Composante sociale

Dans le discours des formateurs, nous relèverons ce qui a trait aux habitudes professionnelles de formation et d'enseignement, à la typologie (supposée ou réelle) des enseignants-stagiaires et de leurs élèves, et tout ce qui se rapporte au collectif de travail constitué de l'ensemble des formateurs d'une même formation ou d'un même organisme de formation.

7.5. Analyse des stages de formation F1 et F2

Notre analyse de la séance de formation F1 comportera trois parties :

- une comparaison du déroulement réel au déroulement prévu ;
- une caractérisation du modèle scientifique scolaire appliqué (proposé pendant la formation) ;
- une analyse des tâches proposées à destination des enseignants-stagiaires.

Notre analyse de la séance de formation F2 comportera deux parties :

- une analyse des tâches proposées à destination des enseignants-stagiaires ;
- une caractérisation du modèle scientifique scolaire appliqué (proposé pendant la formation).

Formation F1 : scénario prévisionnel et chronogénèse réelle

Comme dit précédemment, nous avons procédé à un découpage de la séance de formation en épisodes, afin de repérer ceux qui sont à retranscrire pour mener à bien notre travail⁷⁰.

Pendant la rencontre préparatoire, les formateurs ont produit un déroulé prévisionnel de la séance de formation sur lequel figurent en particulier le contenu de chaque activité⁷¹ ainsi que sa durée prévisionnelle (annexe D). Nous avons effectué une chronogénèse détaillée de la formation (annexe D), dans laquelle figurent les épisodes, le contenu de ces épisodes, leur durée et les lignes de transcription correspondantes (le cas échéant).

Nous comparerons notre chronogénèse au déroulé prévu par les formateurs.

Caractérisation des modèles scientifiques scolaires appliqués

Le modèle scientifique scolaire proposé par les formateurs pendant chaque stage de formation (F1 et F2) sera caractérisé selon la même méthodologie que celle utilisée pour décrire les autres modèles scientifiques scolaires que nous décrirons, qui a été présentée au §7.3. Nous pourrions compléter sa description par des éléments connexes, liés à la progressivité de l'enseignement de l'énergie et la prise en charge des difficultés des élèves relatives à l'apprentissage de l'énergie.

Analyse des tâches à destination des enseignants-stagiaires

Nous relèverons l'ensemble des tâches que les enseignants-stagiaires ont été amenés à effectuer pendant les stages de formation. Celles qui ne mettent en jeu ni le concept d'énergie, ni un modèle scientifique scolaire de l'énergie, ni une ou plusieurs chaînes énergétiques seront brièvement décrites, mais ne seront pas analysées.

Les autres tâches seront décrites et analysées, d'un point de vue didactique et épistémologique. Nous décrirons la composante médiative des pratiques des formateurs en analysant leur discours en lien avec la mise en œuvre de chaque tâche (consigne initiale, conseils et consignes supplémentaires, éléments de réponse et de correction...)

Nous situerons l'activité des enseignants-stagiaires attendue par les formateurs dans le cadre de la modélisation, en identifiant la nature des tâches qui leur ont été proposées. Nous nous intéresserons particulièrement aux tâches mettant en jeu des chaînes énergétiques, en déterminant comment et dans quel but (construction, utilisation, modification ou correction) les formateurs proposent aux enseignants-stagiaires de tracer et d'utiliser des chaînes énergétiques.

70 Ici, nous nous intéressons aux grandes parties de la formation (alternance de tâches proposées aux enseignants-stagiaires et de parties discursives qui s'intéressent à un aspect de l'énergie ou de son enseignement en particulier) pour deux raisons : d'une part, repérer les épisodes « pertinents », d'autre part, comparer le déroulé prévu et le déroulé effectif de la séance (ordre, durée, contenu), c'est pourquoi nous n'avons pas jugé utile de convoquer un cadre méthodologique spécifique qui justifie notre découpage.

71 Nous utilisons ici le mot « activité » dans le sens qui lui est habituellement donné par les enseignants.

Conclusion de la deuxième partie

Dans cette deuxième partie, nous avons précisé les contours de notre travail de recherche, et nous avons justifié son inscription dans un cadre théorique qui met en jeu trois approches épistémologique, didactique et ergonomique.

Nos questions de recherche interrogent les modèles scientifiques scolaires de l'énergie institutionnels (c'est-à-dire : susceptibles d'être considérés par la communauté enseignante comme particulièrement légitimes, valides et favorisant les apprentissages), leur éventuelle représentation par des chaînes énergétiques, et les raisons qui expliquent ces choix de modèles dans un contexte de formation continue à l'enseignement de l'énergie.

La méthodologie mise en œuvre pour répondre à ces questions repose à la fois sur une analyse lexicographique de documents institutionnels et du discours de formateurs académiques, et sur une analyse de chaînes énergétiques promues par les différents acteurs institutionnels que nous avons pris en considération.

Troisième partie :

**Modèles scientifiques scolaires de
l'énergie – analyse de documents
institutionnels**

Le Miroir vivant, René Magritte, 1928

© ADAGP, Paris, 2023

Dans cette troisième partie, nous caractérisons les modèles scientifiques scolaires de l'énergie identifiés dans le programme scolaire de physique-chimie de Cycle 4 de 2015 (chap.8), dans les documents d'accompagnement qui lui ont été associés (chap.9) et dans sept manuels de Cycle qui se réfèrent à ce même programme (chap.10). Le chapitre 11 est consacré à l'analyse des exercices des manuels scolaires qui mettent en jeu l'utilisation de chaînes énergétiques.

Bien qu'ils émanent du même organe (le ministère de l'Éducation nationale, de l'Enseignement supérieur et de la Recherche), nous avons fait le choix d'analyser séparément le programme et les documents d'accompagnement, pour mettre en évidence les similarités et les différences d'approche de l'énergie au sein de ces documents.

Les chapitres qui composent cette partie sont de longueur variable. Celui qui s'intéresse au modèle scientifique scolaire de l'énergie promu par le programme scolaire est particulièrement court, ce qui s'explique par le petit nombre d'éléments relatifs à l'enseignement de l'énergie que nous y avons trouvés. À l'inverse, le chapitre où nous présentons les modèles scientifiques scolaires de l'énergie associés aux sept manuels de Cycle est particulièrement dense : il comporte l'analyse détaillée des parties de cours qui permet de déterminer le modèle de l'énergie proposé dans chacun des manuels. En fin de chapitre (§10.8), nous proposons une synthèse de l'ensemble des modèles identifiés dans les manuels.

8. L'énergie dans le programme de physique-chimie de Cycle 4

Dans ce chapitre, nous allons mettre en évidence le modèle scientifique scolaire de l'énergie porté par le programme de physique-chimie de Cycle 4 (M.E.N.E.S.R., 2015⁷²), en nous intéressant en particulier à la place faite au concept scolaire d'énergie au sein de ce programme, aux caractéristiques qui lui sont attribuées et aux types de représentation proposés – ou imposés – pour les phénomènes énergétiques.

8.1. Place de l'énergie dans le programme

Le programme de physique-chimie de Cycle 4 est composé de quatre thèmes :

- Organisation et transformations de la matière
- Mouvements et interactions
- L'énergie et ses conversions
- Des signaux pour observer et communiquer

Pour chaque thème, le contenu du programme est présenté sous la forme d'un tableau à deux colonnes :

- les « connaissances et compétences associées », liste de phrases courtes à l'infinitif, de mots et d'expressions ;

- les « exemples de situations, d'activités et d'outils pour l'élève », composés de phrases.

Chaque tableau est précédé d'« attendus de fin de cycle » et suivi de « repères de progressivité ».

Nous allons déterminer quelle place est faite au concept scolaire d'énergie au sein de ces quatre thèmes, en commençant par celui qui y fait référence explicitement : *L'énergie et ses conversions*.

Structure du thème « L'énergie et ses conversions »

Le thème *L'énergie et ses conversions* se compose de deux parties distinctes. D'après leurs titres, la première concerne l'*identification des sources, transferts, conversions et formes d'énergie* ainsi que l'*utilisation de la conservation de l'énergie*, et la seconde concerne la *réalisation de circuits électriques simples et l'exploitation des lois de l'électricité* (Tableau 4, Tableau 5). Les contenus du programme associés à la première partie du thème reprennent certaines des caractéristiques fréquemment attribuées à l'énergie dans un contexte scolaire. L'énergie y est présentée comme un concept autonome, sans lien avec un domaine scientifique spécifique. Cependant, la seconde partie de ce thème fait exclusivement référence au domaine de l'électrocinétique.

⁷² Pour éviter d'alourdir inutilement ce chapitre, dans la suite, nous ne mentionnerons pas systématiquement cette référence lorsque nous évoquerons le programme de physique-chimie de Cycle 4 de 2015.

Connaissances et compétences associées	Exemples de situations, d'activités et d'outils pour l'élève
Identifier les sources, les transferts, les conversions et les formes d'énergie Utiliser la conservation de l'énergie	
<p>Identifier les différentes formes d'énergie.</p> <ul style="list-style-type: none"> » Cinétique (relation $E_c = \frac{1}{2} mv^2$), potentielle (dépendant de la position), thermique, électrique, chimique, nucléaire, lumineuse. <p>Identifier les sources, les transferts et les conversions d'énergie.</p> <p>Établir un bilan énergétique pour un système simple.</p> <ul style="list-style-type: none"> » Sources. » Transferts. » Conversion d'un type d'énergie en un autre » Conservation de l'énergie. » Unités d'énergie. <p>Utiliser la relation liant puissance, énergie et durée.</p> <ul style="list-style-type: none"> » Notion de puissance 	<p>Les supports d'enseignement gagnent à relever de systèmes ou de situations de la vie courante</p> <p>Les activités proposées permettent de souligner que toutes les formes d'énergie ne sont pas équivalentes ni également utilisables.</p> <p>Ce thème permet d'aborder un vocabulaire scientifique visant à clarifier les termes souvent rencontrés dans la vie courante : chaleur, production, pertes, consommation, gaspillage, économie d'énergie, énergies renouvelables.</p>

Tableau 4: programme de physique-chimie de Cycle 4, thème L'énergie et ses conversions, première partie (M.E.N.E.S.R., 2015, p.114)

Réaliser des circuits électriques simples et exploiter les lois de l'électricité	
<p>Élaborer et mettre en œuvre un protocole expérimental simple visant à réaliser un circuit électrique répondant à un cahier des charges simple ou à vérifier une loi de l'électricité.</p> <p>Exploiter les lois de l'électricité.</p> <ul style="list-style-type: none"> » Dipôles en série, dipôles en dérivation. » L'intensité du courant électrique est la même en tout point d'un circuit qui ne compte que des dipôles en série. » Loi d'additivité des tensions (circuit à une seule maille). » Loi d'additivité des intensités (circuit à deux mailles). » Relation tension-courant : loi d'Ohm. » Loi d'unicité des tensions. <p>Mettre en relation les lois de l'électricité et les règles de sécurité dans ce domaine.</p> <p>Conduire un calcul de consommation d'énergie électrique relatif à une situation de la vie courante.</p> <ul style="list-style-type: none"> » Puissance électrique $P = U.I$. » Relation liant l'énergie, la puissance électrique et la durée. 	<p>Les exemples de circuits électriques privilégient les dispositifs rencontrés dans la vie courante : automobile, appareils portatifs, installations et appareils domestiques.</p> <p>Les activités proposées permettent de sensibiliser les élèves aux économies d'énergie pour développer des comportements responsables et citoyens.</p>

Tableau 5: programme de physique-chimie de Cycle 4, thème L'énergie et ses conversions, seconde partie (M.E.N.E.S.R., 2015, p.115)

L'énergie en dehors du thème *L'énergie et ses conversions*

Le mot « énergie » n'apparaît qu'une fois dans les trois autres thèmes du programme. Il est mentionné dans la colonne des *Exemples de situations, d'activités et d'outils pour l'élève* du thème *Organisation et transformations de la matière* : « L'étude expérimentale [des changements d'état] sera l'occasion de mettre l'accent sur les transferts d'énergie lors des changements d'état » (M.E.N.S.R.I, 2015, p.110), ce qui est particulièrement difficile : l'énergie libérée ou emmagasinée pendant le changement d'état d'une substance assimilée à un corps pur n'est liée à aucune grandeur mesurable par les élèves, mais uniquement à l'état de la substance considérée.

Les formes d'énergie cinétique, potentielle ou mécanique ne sont pas mentionnées dans le thème *Mouvement et interactions*, dans les repères duquel il est précisé que « les notions de mouvement et de vitesse sont régulièrement mobilisées au cours du Cycle 4 dans les différentes parties du programme comme "Décrire l'organisation de la matière dans l'Univers" et "Des signaux pour observer et communiquer" » – sans faire mention du thème relatif à l'énergie.

Le thème *Des signaux pour observer et communiquer* comporte des éléments pouvant se rapporter au concept scolaire d'énergie – mais sans y faire référence : sources et propagation de la lumière, types de rayonnements (lumière visible, ondes radio, rayons X), propagation des signaux sonores, émission et transmission d'un signal. Les repères de progressivité ne mentionnent pas de liens entre ce thème et celui de l'énergie.

Il est question d'énergie dans les propositions de « croisements entre enseignements »⁷³ relatifs à la transition écologique et au développement durable, en lien avec les sciences de la vie et de la Terre, la technologie, les mathématiques, l'histoire et la géographie et le français. Ici, il est fait référence au concept scolaire *sociétal* d'énergie et non au concept scolaire *scientifique* d'énergie, comme le montrent les expressions choisies par les rédacteurs du programme : « énergie hydroélectrique », « gestion et consommation (...) d'énergie », « exploitation des (...) ressources énergétiques », « énergie : production, consommation, pertes, gaspillage, économie, énergies renouvelables ».

8.2. Modèle scientifique scolaire de l'énergie proposé par le programme de physique-chimie

Dans cette section, nous allons caractériser le modèle scientifique scolaire de l'énergie proposé par le programme de physique-chimie de Cycle 4, au sein du thème *L'énergie et ses conversions*.

Caractéristiques de l'énergie

Dans ce manuscrit, nous avons déjà discuté à plusieurs reprises des caractéristiques qui peuvent être attribuées à l'énergie dans un contexte scolaire : son caractère unificateur, son caractère abstrait, sa conservation, sa dégradation, le fait que ce soit une grandeur, le fait qu'elle se transfère et que ses transferts puissent donner lieu à des conversions, le fait qu'elle puisse prendre plusieurs

⁷³ Les « croisements entre enseignements » sont mentionnés en fin de programme de physique-chimie. Il s'agit d'« exemples de thèmes qui peuvent être travaillés avec plusieurs autres disciplines ». Le programme ajoute que « cette liste ne vise pas l'exhaustivité et n'a pas de caractère obligatoire ».

formes et changer de forme au sein d'un système ou en changeant de système, le fait qu'elle soit stockée dans des systèmes.

Première partie du thème

Dans la première partie du thème *L'énergie et ses conversions* (Tableau 4), certaines caractéristiques sont associées à l'énergie : « formes d'énergie », « sources », « transferts », « conversion d'un type d'énergie en un autre » et « conservation de l'énergie ». Par ailleurs, la mention d'« unités d'énergie » suppose que l'énergie soit présentée comme une grandeur. La « puissance » est présentée comme liée à l'énergie et à la durée par une relation mathématique (« utiliser la relation liant puissance, énergie et durée »).

Des formes d'énergie sont listées (cinétique, potentielle, thermique, électrique, chimique, nucléaire, lumineuse), mais marginalement explicitées : il est uniquement précisé que l'énergie cinétique est associée à la « relation $E_c = \frac{1}{2} mv^2$ » et que l'énergie potentielle « [dépend] de la position ».

Le sens que les auteurs du programme donnent au mot « conversion » n'est pas celui que nous lui attribuons, puisqu'ils évoquent des « conversion[s] d'un type d'énergie en un autre » – par ailleurs, nous ne savons pas si un « type » d'énergie est ici synonyme d'une « forme » d'énergie. La distinction entre conversion, transformation et modification n'est pas proposée, et il est possible que le mot « conversion » renvoie à l'ensemble de ces trois caractéristiques sans les dissocier les unes des autres. Si tel est le cas, nous pouvons supposer que les auteurs assimilent également formes et transferts d'énergie.

Par ailleurs, dans les *Exemples de situations, d'activités et d'outils pour l'élève*, il est indiqué que « les formes d'énergie ne sont pas équivalentes ni également utilisables », ce qui peut être interprété comme une mention de la dégradation de l'énergie – qui n'est pas évoquée dans les *Connaissances et compétences associées* du thème relatif à l'énergie.

Dans cette partie du programme, nous avons vu que la plupart des caractéristiques attribuables à l'énergie dans un contexte scolaire sont évoquées. Cependant, elles ne sont que rarement détaillées ou définies et, lorsqu'elles le sont, leur sens n'est pas toujours conforme à celui qui est le plus consensuel en didactique et pour l'enseignement (chap.3).

Seconde partie du thème

Dans la seconde partie du thème, consacrée à l'étude de circuits électriques, il est peu question d'énergie à proprement parler. Nous remarquons que les caractéristiques du modèle scientifique scolaire de l'énergie ne sont plus mentionnées, à l'exception de la puissance et du fait que l'énergie soit une grandeur, tandis que le vocabulaire associé au concept sociétal d'énergie émerge (« consommation d'énergie électrique », « économies d'énergie »), sans être mis en relation avec le concept scientifique d'énergie.

Éléments spécifiques et progressivité du modèle scientifique scolaire de l'énergie

Nous avons repéré les caractéristiques que les rédacteurs de programme attribuent à l'énergie dans un contexte scolaire. À présent, nous cherchons à déterminer quels sont les éléments

spécifiques qui figurent dans le programme et sont constitutifs d'un modèle scientifique scolaire de l'énergie, liés à une activité de modélisation et de représentation des phénomènes énergétiques.

Nous constatons que le programme ne mentionne pas de tels éléments. Il ne propose pas de définir des systèmes, ni de distinguer certains systèmes les uns des autres. Les éléments qui figurent dans le tableau du programme sont exclusivement associés au monde des théories et des modèles, sans mise en relation avec un monde empirique. L'idée de modélisation n'est pas évoquée. Par contre, les *Exemples de situations, d'activités et d'outils pour l'élève* mettent clairement en avant la distinction entre le monde de la physique et le monde de la vie quotidienne :

« Les supports d'enseignement gagnent à relever de systèmes ou de situations de la vie courante »

« Ce thème permet d'aborder un vocabulaire scientifique visant à clarifier les termes souvent rencontrés dans la vie courante : chaleur, production, pertes, consommation, gaspillage, économies d'énergie, énergies renouvelables »

La chaîne énergétique n'est pas mentionnée dans le contenu du programme, mais elle est évoquée à deux reprises dans les « repères de progressivité » :

- Comme un objet d'étude rencontré par les élèves en technologie :
« La notion d'énergie est présente dans d'autres thèmes du programme de physique-chimie et d'autres disciplines ; les chaînes d'énergie sont notamment étudiées en technologie. Il est donc souhaitable de veiller à une bonne articulation entre les différentes approches disciplinaires de l'énergie pour construire efficacement ce concept. »
- Comme un objet possiblement rencontré par les élèves dans le domaine de l'électrocinétique au Cycle 3, où les programmes de physique-chimie, technologie et SVT sont communs. Cette chaîne d'énergie pourrait donc être commune aux trois disciplines, spécifique à la technologie, ou spécifique aux sciences physiques, mais le paragraphe précédent nous conduit à supposer que les auteurs du programme considèrent ces chaînes comme un objet *de la technologie*.

Le modèle scientifique scolaire de l'énergie proposé par le programme est présenté comme progressif, partant d'une approche qualitative pour aboutir à une approche plus quantitative de l'énergie : les « repères de progressivité » qui terminent le thème *L'énergie et ses conversions* demandent d'amener progressivement les élèves à différencier sources, formes, transferts et conversions de façon à construire « une idée cohérente du délicat concept d'énergie », et précisent que la « pleine maîtrise » de la notion de conservation de l'énergie et celle de la relation entre puissance et énergie sont des objectifs de fin de Cycle.

Liens entre le concept scientifique scolaire d'énergie et le concept sociétal d'énergie

Dans les *Exemples de situations, d'activités et d'outils pour l'élève* de la partie du programme consacrée à l'énergie, il est recommandé de contextualiser l'enseignement de l'énergie dans la vie quotidienne des élèves. Il est aussi précisé que « ce thème permet d'aborder un vocabulaire scientifique visant à clarifier les termes souvent rencontrés dans la vie courante : chaleur,

production, pertes, consommation, gaspillage, économie d'énergie, énergies renouvelables ». Ici, il n'y a pas d'opposition frontale entre le concept sociétal d'énergie et le concept scientifique scolaire d'énergie, ce dernier étant présenté comme un « clarificateur » du vocabulaire associé à l'énergie dans la vie courante.

8.3. Limites

Comme dit en début de chapitre, le programme que nous analysons est court et composé de mots et expressions plus que de phrases, c'est pourquoi son analyse peut sembler subjective sous certains aspects. Par exemple :

- bien que la plupart des mots que nous associons aux caractéristiques de l'énergie dans un contexte scolaire soient mentionnées dans ce programme, ils ne sont pas définis. Or, nous avons vu aux chapitres 2 et 3 qu'un même terme peut évoquer différentes caractéristiques de l'énergie – ce qui est confirmé par le sens donné dans le programme aux conversions, vraisemblablement différent de celui que nous lui donnons et de celui qui lui est attribué en sciences ;

- nous avons considéré qu'aborder l'énergie par ses propriétés (et en particulier par les sources et les formes d'énergie) indique que ce concept doit être présenté en premier lieu sous un angle qualitatif. Cependant, l'absence de définitions et d'indications explicatives laisse la liberté au lecteur de choisir d'aborder ce concept sous un angle plus quantitatif que qualitatif – d'autant plus que les rares informations associées à des formes d'énergie sont à visée calculatoire.

Nous n'avons pas pu analyser de tâches à résoudre à l'aide du modèle scientifique scolaire de l'énergie proposé, parce qu'elles ne sont pas évoquées dans le contenu du programme. Le titre de la première partie du thème *L'énergie et ses conversions* évoque une « utilis[ation] de la conservation de l'énergie », qui n'est pas explicitée dans la suite du programme.

8.4. Conclusion

La structure du programme, que nous avons détaillée dans la première section du chapitre, nous interroge sur le caractère unificateur du concept scientifique scolaire d'énergie qu'il présente : l'énergie est séparée de la mécanique, de la chimie, et de l'étude du son et de la lumière, et elle est particulièrement associée à l'électrocinétique. Cependant, la partie du programme qui s'y intéresse en particulier présente l'énergie comme un concept unificateur, en lui attribuant de multiples formes, en relation avec l'ensemble des domaines pris en charge dans l'enseignement de la physique-chimie.

Un modèle scientifique scolaire de l'énergie est évoqué, mais il est peu détaillé. Il comporte de multiples caractéristiques, qui ne sont pas définies dans le programme, et aucune forme de schématisation n'est proposée pour la représentation des phénomènes énergétiques. Le modèle est présenté comme progressif, aboutissant à la conservation de l'énergie et à sa mise en relation avec le concept de puissance.

Nous supposons que l'appropriation de ce modèle devrait se faire par un travail de modélisation, qui met en relation un monde théorique et un monde empirique. Or, les liens potentiels entre ces deux mondes ne sont pas évoqués dans le programme. Seul le monde théorique est mentionné, à la

fois sous un angle scientifique et sous un angle sociétal, le concept sociétal d'énergie devant être « clarifié » par l'utilisation du modèle scientifique scolaire de l'énergie.

La structure et la concision de ce programme ne nous permettent pas d'établir clairement un modèle scientifique scolaire de l'énergie, dont nous supposons qu'il sera éclairci par les documents d'accompagnement. Ils nous amènent également à nous interroger sur la manière dont la communauté enseignante – au sens large – s'est approprié ce concept.

9. L'énergie dans les documents d'accompagnement Eduscol de Cycle 4

Nous avons relevé l'ensemble des documents du site Internet Eduscol relatifs à l'enseignement de l'énergie au Cycle 4, parus en 2016 (annexes C). Il s'agit de :

- un document d'aide à la construction d'une progression en physique-chimie au Cycle 4 – annexe C1 (M.E.N.E.S.R., 2016f⁷⁴) ;
- un document de pistes pour la construction d'une progression sur le thème *L'énergie et ses conversions* – annexe C2 (M.E.N.E.S.R., 2016a⁷⁴) ;
- une proposition d'activité⁷⁵ intitulée « Quelle bouilloire chois-tu ? Pourquoi ? » – annexe C3 (M.E.N.E.S.R., 2016c⁷⁴) ;
- une proposition d'activité⁷⁵ intitulée « Sur un circuit automobile, quelle voiture pourra atteindre la vitesse de 320 km/h avant la moto ? » – annexe C4 (M.E.N.E.S.R., 2016e⁷⁴) ;
- une proposition d'activité⁷⁵ intitulée « Quel volume de boisson au cola compense les dépenses d'énergie d'un cycliste faisant l'ascension du Mont Ventoux ? » – annexe C5 (M.E.N.E.S.R., 2016b⁷⁴).

Dans ce chapitre, nous décrivons le modèle scolaire de l'énergie proposé dans les documents de progression, puis nous analysons les trois activités⁷⁵ recensées. Nous nous intéressons en particulier aux chaînes énergétiques proposées dans l'ensemble de ces documents.

9.1. L'énergie dans les documents d'aide à la construction de progressions

Le concept d'énergie est mentionné dans deux documents d'aide à la construction de progressions pour le Cycle 4 : un document général, qui propose une progression pour l'ensemble des thèmes tout au long du Cycle, et un document spécifique au thème *L'énergie et ses conversions*.

Ils sont accompagnés d'un autre document, court (deux pages), qui propose des « Repères pour l'enseignement de la physique-chimie au cycle 4 » (annexe C6 ; M.E.N.E.S.R., 2016d). Ce texte ne mentionne ni l'énergie, ni aucun des thèmes d'enseignement de physique et chimie – c'est pourquoi nous ne l'avons pas analysé – mais met en avant le caractère expérimental de l'enseignement de physique-chimie et le « travail de modélisation », « objectif central de la formation en physique-chimie ».

Document d'aide à la construction d'une progression en physique-chimie au Cycle 4

Description du document

Ce document propose aux enseignants des pistes aboutissant à une progression en physique-chimie qui prend en compte l'ensemble du contenu du programme, c'est-à-dire les notions qui constituent les quatre thèmes à enseigner tout au long des trois années de Cycle 4.

⁷⁴ Pour éviter d'alourdir le texte, nous n'indiquerons pas ces références par la suite.

⁷⁵ Dans ce chapitre, le mot « activité » doit être entendu dans le sens qui lui est classiquement attribué dans l'enseignement, et non en didactique.

Cette progression repose sur trois « types de progressivité :

- [une] construction progressive des modèles explicatifs ou des concepts ;
- l'augmentation progressive du degré de complexité des situations choisies ;
- la prise en compte de la progressivité dans d'autres disciplines, mathématique, SVT et technologie notamment. »

Pour chaque thème ou partie de thème, les auteurs proposent :

- un rappel du programme ;
- un rappel des attendus de fin de Cycle 2 ou 3 ;
- les « sauts conceptuels » au Cycle 4 ;
- une proposition de progression.

Ils évoquent ensuite des « notions implicites du programme utiles en terme d'apprentissage » et des « pistes de contextualisation ».

L'énergie est mentionnée dans la partie relative au thème *L'énergie et ses conversions*, puis elle est évoquée brièvement dans les « notions implicites du programme utiles en terme d'apprentissage » et, plus largement, parmi les « pistes de contextualisation ».

Modèle scolaire de l'énergie au Cycle 3

Lorsque les auteurs parlent du concept scolaire d'énergie tel qu'il est enseigné au Cycle 3, ils l'évoquent en tant que concept sociétal (notre mise en gras) :

« Au cycle 3, l'élève prend conscience que **l'être humain a besoin d'énergie dans sa vie quotidienne**. Il identifie des sources et des formes d'énergie et apprend à reconnaître des **situations où l'énergie est stockée, transformée et utilisée**. Il est amené à identifier les éléments d'une chaîne domestique simple et **sensibilisé à des dispositifs visant à économiser l'énergie**. La notion d'**énergie renouvelable** est également abordée. »

Les formes d'énergie, le stockage de l'énergie et sa transformation (notre soulignage) sont également mentionnés, sans que l'on sache quel sens leur est donné : les « situations où l'énergie est stockée, transformée et utilisée » peuvent être interprétées à la fois sous un angle sociétal (par exemple : stockage de matières fossiles, transformation chimique de ces matières à des fins d'utilisation domestique) ou sous un angle scientifique, puisque stockage et transformation de l'énergie sont des caractéristiques couramment associées au concept scientifique scolaire d'énergie. Cependant, l'absence de liens logiques directs entre stockage, transformation et utilisation de l'énergie dans un contexte scientifique nous laisse supposer que le point de vue adopté par les auteurs est largement sociétal.

Un concept unificateur au Cycle 4

Dans ce document, nous n'avons pas relevé de précisions pour les caractéristiques de l'énergie proposées par le programme (formes, conservation, conversion, transferts).

Cependant, les auteurs donnent au concept d'énergie une dimension unificatrice, en proposant de le convoquer dans l'ensemble des thèmes de la physique-chimie :

« Le thème de l'énergie au cycle 4 peut constituer un fil d'Ariane que l'on va suivre lors de l'étude des différents autres thèmes. C'est le cas pour l'électricité (la facture d'électricité peut-être un bon support d'étude) et pour le mouvement. C'est aussi le cas pour les transformations physiques et les transformations chimiques de la matière ou les signaux. »

Ils proposent d'aborder l'énergie chimique par l'étude des combustions en 4^e, puis, en 3^e, de l'évoquer en lien avec les mélanges et les transformations chimiques, mentionnant les « dissolutions exo ou endothermiques » et les piles électrochimiques. En mécanique, il s'agit de réinvestir le travail effectué sur l'énergie cinétique et sa « modélisation mathématique » ainsi que sur l'énergie potentielle. En revanche, l'énergie n'est pas mentionnée dans la seconde partie du thème *L'énergie et ses conversions*, en lien avec le domaine de l'électrocinétique.

Énergie et modélisation

La modélisation est évoquée par les auteurs, mais uniquement sous un angle mathématique, comme en témoigne le paragraphe que nous reproduisons ci-après :

« Au cycle 4, sont réinvestis les acquis du cycle 3 et l'on va plus loin en abordant la conservation de l'énergie et la modélisation mathématique de la relation entre énergie, puissance et durée. Deux autres expressions littérales sont proposées : la puissance électrique (en régime continu) et l'énergie cinétique d'un objet en mouvement (sous-entendu de translation). »

Notions implicites du programme utiles en terme d'apprentissage liées à l'énergie

Deux « notions implicites du programme utile en terme d'apprentissage » pour le thème *L'énergie et ses conversions* sont en lien avec le concept d'énergie : il s'agit de la « représentation d'une chaîne énergétique » et des « énergies renouvelables », qui ne sont ni définies, ni commentées.

Pistes de contextualisation

L'énergie est mentionnée à plusieurs reprises parmi les pistes de contextualisation, à lier avec le contenu du programme :

- les « énergies fossiles » et « énergies renouvelables » (fil conducteur : changement climatique) ;
- le « diagnostic de performance énergétique » et « Peut-on produire plus d'énergie qu'on en consomme ? » (fil conducteur : l'habitat) ;
- les « formes d'énergies mises en jeu dans le scooter » (fil conducteur : se déplacer) ;
- « Alimenter son habitat en énergie » (fil conducteur : s'installer sur une nouvelle planète).

Le document ne donne pas d'indications quant à la nature des liens qui doivent être faits entre ces expressions, associées au concept sociétal d'énergie, et les connaissances relatives au concept scientifique scolaire d'énergie, qui figurent au programme de physique-chimie.

Pistes pour la construction d'une progression sur le thème *L'énergie et ses conversions*

Description du document

Ce document est composé de trois parties : une introduction, une « explicitation de la ressource », et une proposition de progression pour le thème *L'énergie et ses conversions*.

Dans l'introduction, les auteurs mentionnent des textes de références qu'ils ont pris en compte pour l'élaboration de leur proposition de progression. Il s'agit de propos tenus par Feynman, relatifs à la nature de l'énergie (notion complexe, difficile à construire, abstraite et difficile à définir), et de résultats de la recherche en didactique issus de l'article « Quelle progression dans l'enseignement de l'énergie de l'école au lycée ? Une analyse des programmes et des manuels. » (Bächtold *et al.*, 2014). Les auteurs de la proposition de progression notent deux points de consensus :

- « Commencer au cycle 3 par une approche qualitative à laquelle se substitue progressivement une approche quantitative au cycle 4, pour parvenir à la notion de conservation de l'énergie ; »
- « Introduire progressivement les ingrédients essentiels nécessaires à la construction du concept d'énergie : les sources et les formes d'énergie, les notions de transformation ou de conversion, de transfert, de dissipation et pour terminer de conservation de l'énergie. »

La partie dédiée à l'explicitation de la ressource reprend les éléments du programme de Cycle 4 et les prérequis de Cycle 3 et place la chaîne énergétique au centre de la proposition de progression. Il est précisé que cet exemple de progression, « en prenant appui sur les acquis du cycle 3, a pour objectifs de stabiliser le vocabulaire autour de l'énergie, d'effectuer des bilans quantitatifs et d'associer progressivement le concept d'énergie à la notion de conservation. »

L'exemple de progression est présenté sous la forme d'un tableau à quatre colonnes : les éléments de programme, et le contenu que l'on propose de leur associer selon le niveau scolaire (5^e, 4^e, 3^e).

Caractéristiques de l'énergie

Dans ce document, l'énergie est présentée comme un concept abstrait (dans l'introduction), quantifiable, susceptible de prendre plusieurs formes, et auquel peuvent être attribuées les caractéristiques de conservation, transfert, transformation, conversion et dissipation, ainsi que les notions de sources et de puissance. À plusieurs reprises, il est fait mention de l'« utilisation » de l'énergie comme étant une de ses caractéristiques (par exemple : « Un choix a été fait : l'introduction de l'énergie en partant des sources, des transformations et de l'utilisation » ; « l'élève identifie source, stockage, transformations et utilisation de l'énergie »).

L'ensemble de ces caractéristiques sont présentes dans le programme, à l'exception de la dissipation – et de l'utilisation. Les sources d'énergie sont distinguées des formes d'énergie, dont la liste est donnée par citation du programme. Les transferts ne sont ni définis, ni listés ; les transformations et conversions d'énergie ne sont pas définies. La dissipation est présentée comme un « processus » et est évoquée en lien avec le concept de dégradation de l'énergie : « certaines [formes d'énergie] (...) sont peu ou pas réutilisables (dissipation d'énergie sous forme d'énergie thermique par exemple) ».

La conservation de l'énergie est présentée comme l'aboutissement de l'enseignement de l'énergie au collège. C'est la seule propriété de l'énergie à être clairement définie dans le document : « L'étude des différentes conversions permettent d'aborder la notion de conservation de l'énergie qui n'a jamais été explicitée jusqu'à maintenant : même quantité d'énergie qui entre dans le convertisseur que celle qui sort ». C'est une définition *locale* de la conservation de l'énergie, qui n'est pas présentée comme une grandeur conservative *dans le temps*. Par ailleurs, elle est construite en référence aux conversions et aux « convertisseurs », qui ne sont mentionnés nulle part ailleurs sur le document.

Les chaînes énergétiques, un point d'appui pour l'enseignement de l'énergie

Dans ce document, les chaînes énergétiques sont présentées comme un point d'appui majeur pour l'enseignement de l'énergie. Elles sont évoquées dès le début de l'« explicitation de la ressource », à la suite des prérequis et attendus de fin de Cycle 3 ; nous reproduisons le texte et l'illustration qui lui est associée à la Figure 35.

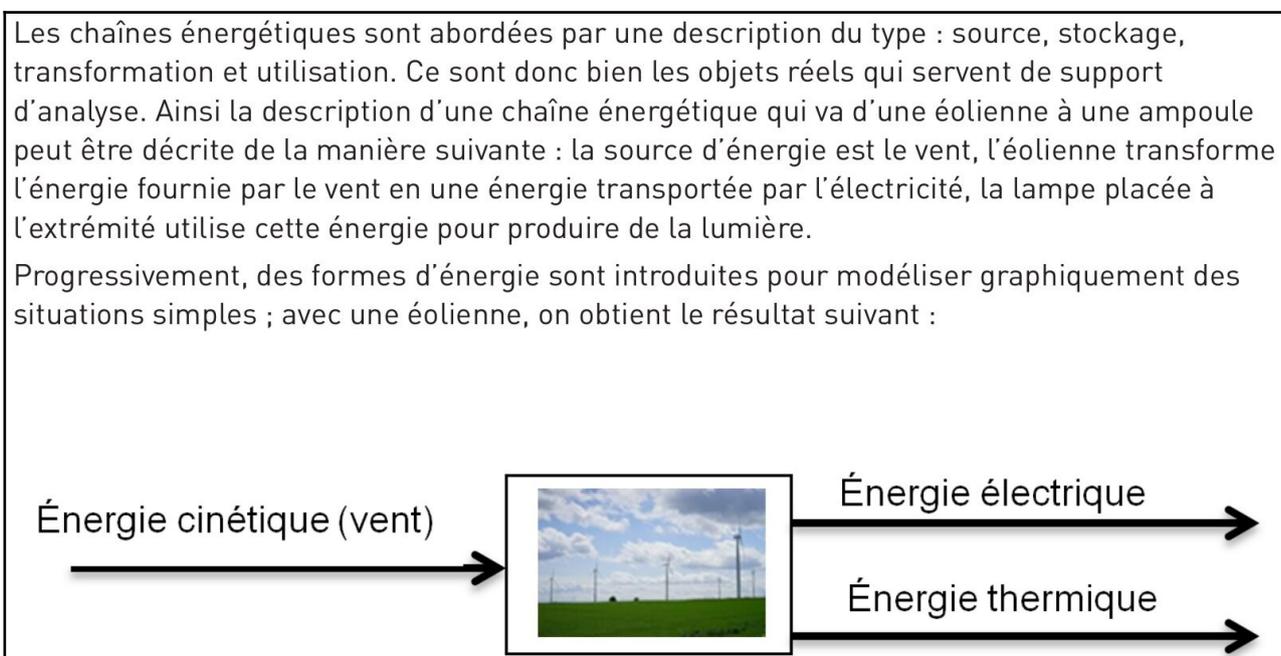


Figure 35: introduction des chaînes énergétiques dans la proposition de progression (document Eduscol, annexe C2)

Bien que les auteurs présentent leur chaîne énergétique de Cycle 3 comme la *modélisation graphique* d'une éolienne, il est difficile de lui associer des règles de modélisation claires. En particulier, ce que représente la flèche entrante (énergie cinétique associée à la source d'énergie) n'est pas de même nature que ce que représente la flèche sortante « énergie électrique », qui n'est associée à aucun système particulier. Cette chaîne énergétique semble conçue comme un objet hybride, appartenant à la fois au monde matériel (photographie du champ d'éoliennes) et au monde théorique (flèches, formes d'énergie)⁷⁶.

⁷⁶ De la même manière, l'expression « [il peut être intéressant] de rappeler à l'élève qu'en amont de la prise de courant il y a une chaîne énergétique » (notre mise en gras) suggère une mise en relation directe entre un objet du

Le document ne propose pas d'exemple de chaînes énergétiques pour le Cycle 4, mais énumère les éléments qui permettent sa représentation. En cinquième, il s'agit des « source, stockage, transformations et utilisation de l'énergie ». En quatrième, les auteurs évoquent les sources d'énergie et les formes qui leurs sont associées, les « conversions dans la chaîne » et les « formes d'énergie en bout de chaîne » ; les élèves de quatrième doivent « [repérer] les dissipations d'énergie dans une chaîne énergétique ». Les transferts d'énergie ne sont jamais mentionnés en lien avec la chaîne énergétique. En classe de troisième, il est proposé que « l'élève [traduise] une situation donnée par une chaîne énergétique, (...) en identifie les différents éléments et l'exploite en termes scientifiques et sociétaux ».

La chaîne énergétique évoquée dans ce document permet la représentation de l'ensemble des caractéristiques de l'énergie, à l'exception des transferts (nous ne pouvons affirmer que la conservation locale de l'énergie soit évoquée en lien direct avec les chaînes énergétiques, bien que certains indices semblent l'indiquer – en particulier, le fait d'associer la conservation de l'énergie à l'énergie qui entre et qui sort d'un convertisseur). D'après nos recherches (§4.5), il n'est pourtant pas possible d'utiliser un unique type de chaîne énergétique qui représente toutes ces caractéristiques.

Pourquoi enseigner l'énergie au collège ?

Dans ce document, les auteurs expliquent les raisons pour lesquelles les rédacteurs de programmes ont choisi de faire de l'énergie un thème d'enseignement à part entière au collège en physique-chimie. Bien que cela ne soit pas directement lié aux questions de recherche auxquelles nous répondons par l'analyse de documents institutionnels (mise en évidence de modèles scientifiques scolaires de l'énergie et identification des chaînes énergétiques), il nous a semblé opportun de mentionner ces raisons. Nous reproduisons donc ci-après leurs propos (notre mise en gras) :

« Face à la complexité de la notion d'énergie, il aurait été simple de repousser son apprentissage au lycée. Ce choix n'a pas été fait par les concepteurs du programme, en raison de **l'importance de ce concept dans la vie de tous les jours, parce que chaque être vivant a besoin d'énergie pour vivre, chaque machine a besoin d'énergie pour fonctionner ; la raison d'introduire la notion d'énergie dans les programmes de sciences est donc sociétale, et elle permet de sensibiliser les élèves à la problématique du défi énergétique**. La bonne compréhension du fonctionnement des chaînes énergétiques et du vocabulaire associé est essentielle à la **formation du citoyen de demain** : comprendre qu'une perte d'énergie est en fait une transformation d'énergie en une forme plus difficile à valoriser permet de **progresser dans la compréhension des enjeux du monde qui nous entoure**. »

Il apparaît que l'enseignement de l'énergie au collège a pour objectif la formation du citoyen, en lien avec la « problématique du défi énergétique ». Cette formation se fait autour de deux axes : la représentation des phénomènes énergétiques par des chaînes énergétiques, et la maîtrise du vocabulaire associé au concept d'énergie. L'exemple donné met en lien le vocabulaire de la vie courante, associé au concept *sociétal* d'énergie (les pertes d'énergie), et le vocabulaire scientifique, associé au concept *scientifique* d'énergie. Cependant, le vocabulaire présenté ici comme scientifique

monde empirique (la prise de courant) et une représentation associée au monde théorique (la chaîne énergétique).

(« transformation d'énergie en une forme plus difficile à valoriser ») fait appel à des caractéristiques de l'énergie qui n'ont pas été clairement définies dans ce document (formes d'énergie, transformation d'énergie, dégradation de l'énergie).

Conclusion de section

Les propositions de progression que nous avons analysées présentent un modèle scientifique scolaire de l'énergie lacunaire comparable à celui promu par le programme, qui attribue de nombreuses caractéristiques au concept scolaire d'énergie, sans les expliciter. La chaîne énergétique apparaît comme un élément implicite du programme, nécessaire à l'enseignement de l'énergie au collège. Ses règles de construction et d'utilisation ne sont cependant pas précisées dans les documents que nous avons analysés.

9.2. « Quelle bouilloire choisis-tu ? Pourquoi ? »

Description de l'activité

Selon les auteurs du document, les objectifs liés à la réalisation de cette activité sont de « donner du sens à la notion de puissance », « relier les notions de puissance, énergie et durée », et « réaliser un bilan énergétique ».

Le document à destination des élèves est composé de deux questions (« Quelle bouilloire choisis-tu ? Pourquoi ? ») associées à trois extraits de notices de bouilloires, sur lesquelles on trouve : une photographie de la bouilloire, son « numéro de modèle », sa « couleur », le « poids de l'article » (exprimé en « Kg » ou en « g »), les « dimensions du produit », sa « capacité » (exprimée en « litres ») et sa « puissance » (exprimée en « Watts »).

L'activité proposée est à caractère expérimental. Dans le « scénario possible » proposé, les élèves connaissent la relation mathématique qui relie puissance et énergie, et sont amenés à « vérifier si, pour un besoin en énergie donné :

- plus un appareil est puissant, plus sa durée de fonctionnement est courte ;
- plus un appareil est puissant, plus il convertit d'énergie. »

Pour ce faire, on propose un protocole expérimental permettant de mesurer la durée nécessaire pour qu'un même volume d'eau à température ambiante chauffé par chacune des trois bouilloires atteigne une température de 100°C.

Après avoir vérifié que « la bouilloire la plus puissante est la plus rapide pour transférer l'énergie », les élèves sont invités à « calculer l'énergie convertie » à l'aide de la formule qui relie puissance, énergie et durée d'utilisation de l'appareil électrique, ce qui les amène à « [découvrir] que l'énergie convertie par chaque bouilloire est à peu près la même » – bien que le protocole expérimental demandait à ce que toutes les bouilloires soient utilisées « pour un [même] besoin en énergie donné ».

Caractéristiques de l'énergie mobilisées

Dans le scénario exposé, il est proposé de s'intéresser « uniquement aux caractéristiques électriques : puissance et énergie convertie ».

Ces caractéristiques ne sont pas explicitées :

- Les puissances indiquées sont associées aux bouilloires : la puissance électrique « reçue » par la bouilloire n'est pas distinguée de la puissance associée au transfert d'énergie destiné à chauffer l'eau qu'elle contient. Bien que l'énoncé ne le précise pas, il faut donc considérer que toute l'énergie reçue par la bouilloire (par un mode de transfert électrique) est transmise à l'eau.
- Les expressions « énergie convertie » et « énergie transférée » sont utilisées de façon équivalente, sans qu'il soit fait mention du sens donné aux mots « convertir » et « transférer » ou de la nature des systèmes – ou objets – associés à un transfert ou à une conversion.

Aucune autre caractéristique de l'énergie n'est évoquée dans cette activité ; les chaînes énergétiques ne sont pas mentionnées.

Un concept d'énergie plus sociétal que scientifique scolaire

Les extraits de notice qui composent l'énoncé sont formulés dans un registre *sociétal* plutôt que *scientifique* : la masse des objets (registre scientifique) est appelée « poids » (registre sociétal), l'unité associée peut être le « Kg » (registre sociétal), le volume intérieur de la bouilloire (registre scientifique) est appelé « capacité » (registre sociétal), et la grandeur « puissance » est associée à un objet (registre sociétal) et non à un transfert (registre scientifique).

Par ailleurs, dans cette activité, l'énergie est définie *mathématiquement*, en relation avec la puissance d'un appareil électrique et sa durée d'utilisation.

Si certaines caractéristiques habituellement associées au concept scientifique scolaire d'énergie sont mentionnées (puissance, transfert, conversion), leur explicitation n'est pas faite et leur compréhension n'apparaît pas nécessaire pour résoudre le problème posé.

Nous disposons donc d'un certain nombre d'indices laissant à penser que le concept d'énergie présenté dans cette activité est davantage *sociétal* (et mathématique) que *scientifique*.

9.3. « Sur un circuit automobile, quelle voiture pourra atteindre la vitesse de 320 km/h avant la moto ? »

Description de l'activité

La fiche-élève associée à cette activité est composée :

- d'une consigne :

« La Kawasaki H2R est souvent présentée comme étant la moto de série la plus rapide du monde.

Lors d'un essai sur circuit automobile, cette moto est comparée à trois voitures très puissantes...

Laquelle de ces voitures pourra atteindre 320 km/h avant la moto ? »

- de la photographie d'une moto et de trois voitures, accompagnées des légendes suivantes :

- Kawasaki H2R : 236 ch ; 217 kg
- Mac Laren : 625 ch ; 1375 kg

- Bugatti : 1100 ch ; 2136 kg
- Nissan : 1350 ch ; 2350 kg

Les auteurs proposent des aides que les enseignants peuvent fournir aux élèves en cas de besoin (il est précisé que la formulation choisie pour les expressions mathématiques peut varier selon le niveau des élèves, la progression, etc.) :

- un document indiquant que le cheval-vapeur est une unité de puissance et donnant la valeur d'un cheval-vapeur en watts ;

- un document donnant la relation mathématique entre « énergie », « puissance » et « temps » ainsi que les unités associées à ces trois grandeurs (pour l'énergie : le joule et le watt-heure ; pour la puissance : le watt ; pour le temps : la seconde et l'heure) ;

- un document donnant l'expression de l'énergie cinétique et précisant les unités de grandeurs (masse, notée m , en kg ; vitesse, notée V , en m/s) ;

- une liste d'autres aides possibles (nous avons mis en gras celles qui ne sont pas d'ordre mathématique) :

- **proposer de traduire l'énoncé par un schéma qui permet de faire une étude énergétique** (reproduit à la Figure 36) ;
- **demander quelle forme d'énergie possède un corps en mouvement** ;
- trois autres aides permettent de guider les conversions et les calculs à effectuer.

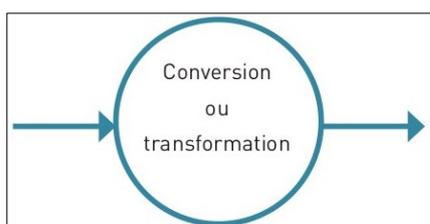


Figure 36: aide permettant de tracer une chaîne énergétique (annexe C4, p.5)

Une activité de modélisation

Les auteurs de cette activité proposent de guider les élèves dans une démarche de modélisation qui aboutit au tracé de chaînes énergétiques (appelées « diagrammes énergétiques » ou « schéma[s] qui permet[tent] de faire une étude énergétique ») et à l'obtention de résultats numériques par l'utilisation d'expressions mathématiques.

Certains choix de modélisation sont explicités : dans un premier temps, la masse du conducteur est négligée et les « différentes formes de dissipation d'énergie » ne sont pas prises en compte⁷⁷.

Une première chaîne énergétique est proposée (Figure 37) ; elle ne sera pas exploitée par la suite.

⁷⁷ Bien que les auteurs disent que les « différentes formes de dissipation d'énergie » ne sont pas prises en compte, ils décrivent les « transmissions » de l'énergie qui permettent à la voiture d'acquérir de l'énergie cinétique en soulignant les frottements – nécessaires – entre les roues et la route.

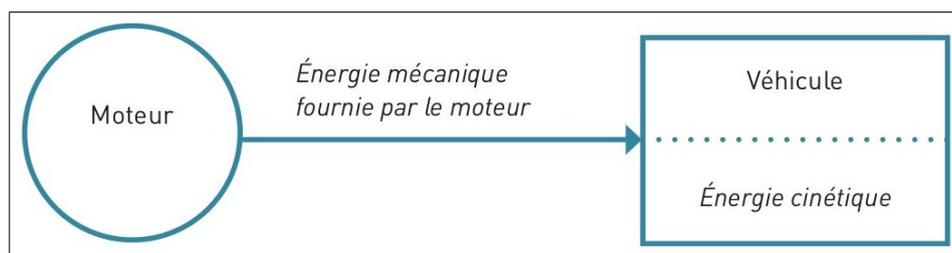


Figure 37: chaîne énergétique associée à un véhicule roulant, sans prise en compte de la dissipation (annexe C3, p.6)

Puisque la dissipation n'est pas prise en considération dans ce modèle, l'énergie totale « fournie » par le moteur est considérée comme égale à l'énergie cinétique finale de la voiture. Le principe de conservation de l'énergie n'est pas évoqué pour justifier cela (aucune occurrence pour « conservation », « conserve » ou « conserver » dans le document⁷⁸).

Ce premier modèle permet d'obtenir une réponse à la question posée *via* l'utilisation d'un ensemble de relations mathématiques dont les résultats sont présentés dans un tableau qui indique, pour chaque véhicule :

- la puissance (en ch et en W), ;
- la masse ;
- l'énergie cinétique (il n'est pas précisé s'il s'agit de l'énergie cinétique « finale », de la différence d'énergie cinétique entre l'arrêt et la vitesse maximale atteinte, ou de toute autre valeur d'énergie cinétique) ;
- la durée (notée « t », calculée par la formule E_c/P et exprimée en secondes).

Les durées obtenues par le calcul sont comparées à celles obtenues en situation réelle, par le visionnage d'une vidéo sur laquelle on voit chaque voiture – l'une après l'autre – accélérer jusqu'à atteindre la vitesse de 320 km/h, en compétition avec la moto. On constate que les durées réelles sont plus grandes que celles qui ont été calculées (en particulier dans le cas de la moto).

Il est proposé que ces différences soient discutées dans la classe en regard des choix initiaux de modélisation, et aboutissent à une modification du modèle initial :

- Dans le cas de la moto, une modification de la valeur d'énergie cinétique du fait de la masse du conducteur – non négligeable par rapport à celle du véhicule – est évoquée.
- Les « pertes énergétiques » (négligées jusque-là) peuvent être quantifiées : elles expliquent l'écart résiduel entre la durée prévue par le calcul et la durée réelle nécessaire pour que chaque véhicule atteigne 320 km/h. Une chaîne énergétique prenant ces « pertes » en considération est proposée, sans être introduite ni commentée (Figure 38).

⁷⁸ Le mot « conservation » figure néanmoins dans les « attendus de fin de Cycle » reproduits en début de document.

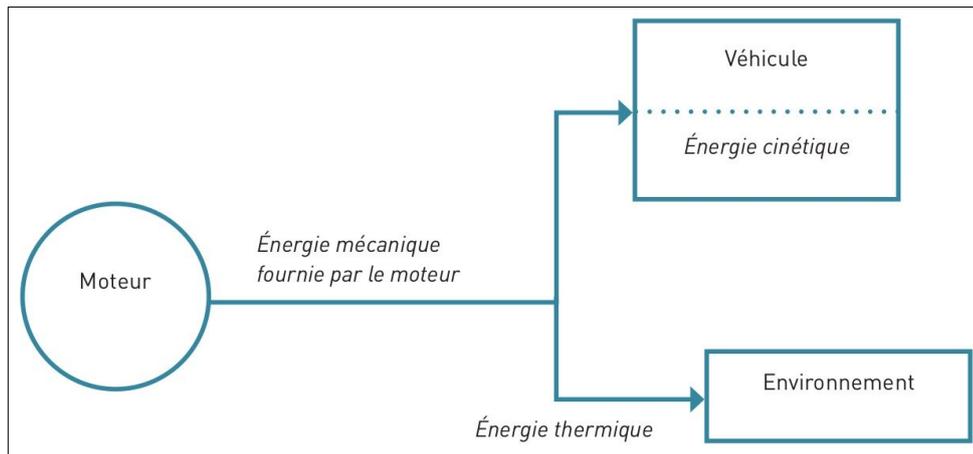


Figure 38: chaîne énergétique d'un véhicule roulant avec prise en considération de frottements (annexe C4, p.7)

D'autres limites sont évoquées, en lien avec le monde empirique, mais sans préciser à quels éléments du modèles elles sont reliées : les « conditions de banc d'essai » sont différentes des conditions réelles, et « l'énergie fournie par le moteur n'est pas constante (on passe les vitesses donc la puissance instantanée n'est pas du tout égale à la puissance moyenne). » Les auteurs soulignent également qu'« il est ensuite possible de signaler aux élèves que la masse d'une voiture lui permet de maximiser l'adhérence et donc de convertir l'énergie fournie en énergie "utile" avec plus d'efficacité. »⁷⁹

En fin de document, les auteurs ajoutent que les chaînes énergétiques proposées jusque là sont incomplètes « dans la mesure où le moteur ne peut être considéré comme une source d'énergie : il se comporte davantage comme un dispositif qui convertit de l'énergie. » S'en suit une chaîne « complète », que nous avons reproduite à la Figure 39.

79 Si l'adhérence de la voiture est assimilée aux frottements entre les pneus et la route, la phrase citée signifie que plus il y a de frottements, moins il y a de « pertes » énergétiques pour le véhicule. Les frottements sont nécessaires pour qu'il y ait une mise en mouvement du véhicule. S'ils sont trop faibles, il y a dérapage et une partie de l'énergie fournie par le moteur est « perdue », dans le sens où elle ne permet pas l'augmentation de l'énergie cinétique totale du véhicule (énergie dite « utile ») et n'est pas non plus « dissipée » par frottements entre la route et les pneus. S'il n'y a pas de dérapage, il est abusif de dire que les frottements maximisent la « conversion » d'énergie fournie par le moteur en énergie « utile » au véhicule. En effet, si l'on considère un véhicule roulant à une vitesse fixe, une augmentation des frottements implique une augmentation de la puissance fournie par le moteur – et non une augmentation de l'efficacité de conversion.

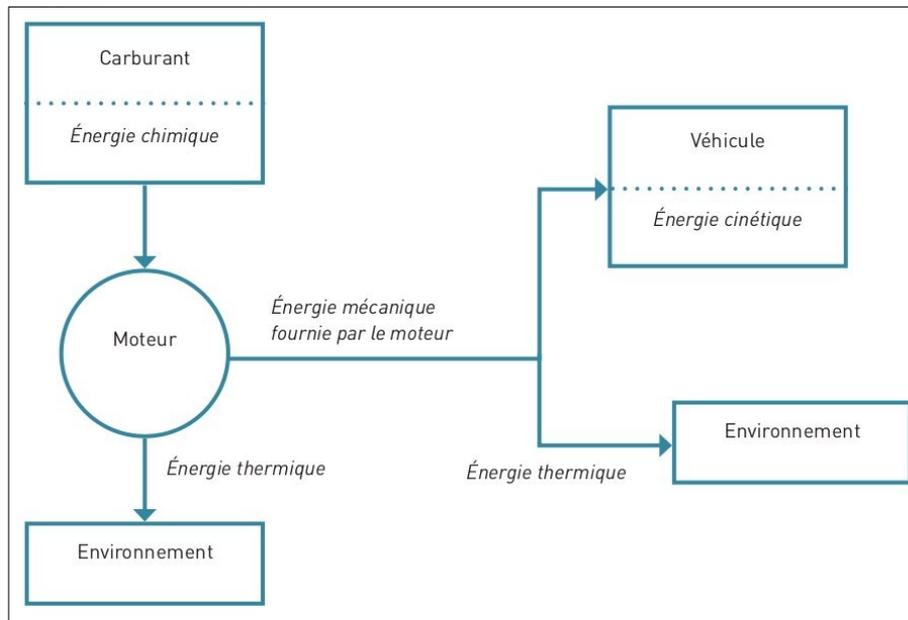


Figure 39: chaîne énergétique associée à un véhicule roulant "complète" (annexe C4, p.8)

Selon ses auteurs, cette chaîne permet de comparer « l'énergie fournie par la source et l'énergie cinétique "utile". »

Représentation et utilisation des chaînes énergétiques

Dans ce paragraphe, nous reprenons les chaînes énergétiques représentées dans les figures 36 à 39, que nous analysons successivement. Nous n'avons pas pu établir de méthodologie claire de réalisation et d'interprétation de ces chaînes, bien que certaines règles de représentation soient exposées dans le document.

Parmi les aides données, on trouve une proposition de formalisme pour une « étude énergétique » : un cercle représente une « conversion ou transformation » ; une flèche entre et une flèche sort de ce cercle, sans que l'on sache ce qu'elles représentent (Figure 36). Nous supposons que les auteurs considèrent qu'une « conversion » est associée à un changement de mode de transfert et qu'une « transformation » est associée à un changement de forme d'énergie au sein d'un système. Ils proposent une représentation commune à ces deux caractéristiques de l'énergie : les flèches représentent donc soit un mode de transfert (cas de la conversion), soit une forme d'énergie (cas de la transformation). Malgré les indications de la Figure 36, il apparaît difficile que le cercle représente une conversion ou une transformation : il pourrait plutôt représenter un système effectuant une conversion, que nous appelons *convertisseur*⁸⁰.

Plus loin, des précisions sont apportées pour la représentation des phénomènes par des chaînes énergétiques : le formalisme proposé est non prescriptif, laissé à l'appréciation de chacun. Les sources et réservoirs – qui ne sont pas définis – sont représentés par des rectangles dans lesquels peuvent être mentionnées des formes d'énergie (une pour chaque rectangle). Les auteurs proposent

80 Il pourrait aussi représenter un système qui subit une transformation, mais dont les formes d'énergie seraient indiquées à l'extérieur du système. Puisque les situations de transformation ne seront pas abordées dans la suite de l'activité, nous ne nous attardons pas sur cette possibilité.

qu'une ellipse représente une conversion, mais le cercle qui figure sur la chaîne qui suit (Figure 37) représente clairement un moteur – c'est-à-dire un système ou un objet, et non une caractéristique de l'énergie. Par ailleurs, cette chaîne pourrait suggérer que la définition attribuée par les auteurs au mot « conversion » ne soit pas identique à la nôtre (changement de type de transfert), dans la mesure où il n'y a pas de flèche « entrante » dans le moteur. Par la suite, les auteurs discuteront de cette question, et proposeront une représentation qui, selon eux, tient compte du rôle de conversion du moteur (Figure 39). La question de l'inclusion – ou non – du système {moteur} dans le système {véhicule} n'est pas évoquée.

La chaîne suivante prend en considération les frottements (Figure 38). Ceci se manifeste par une séparation en deux de la flèche qui représente l'« énergie mécanique fournie par le moteur » : une partie de cette énergie devient de l'« énergie thermique », à destination d'un réservoir appelé « environnement ». Cette forme d'énergie est indiquée sur la flèche qui pointe sur le rectangle « environnement », contrairement à l'énergie cinétique associée au véhicule qui, elle, est inscrite dans le rectangle « véhicule ».

La plus complète des chaînes (Figure 39) est similaire à la précédente, mais comporte deux ajouts :

- une « source d'énergie », représentée par un rectangle relié au moteur par une flèche (orientée du rectangle vers le cercle), appelée « carburant » et à laquelle est associée une « énergie chimique » ;

- un second rectangle « environnement », relié au cercle associé au moteur par une flèche en provenance de ce dernier, sur laquelle est inscrit « énergie thermique ».

L'ensemble des chaînes proposées repose sur la distinction entre réservoirs et convertisseurs, qui ne sont pas définis. Les formes d'énergie considérées peuvent être associées à une source (carburant), à un réservoir (véhicule) ou à certaines flèches (« énergie mécanique fournie par le moteur », « énergie thermique »). Or, les formes d'énergie *mécanique* et *thermique* devraient être – par définition – attribuées à des systèmes⁸¹. Le fait de les associer à des flèches traduit une confusion entre *formes* et *transferts* d'énergie.

Les chaînes proposées dans cette activité ont une fonction essentiellement *représentative*. Elles sont présentées comme des illustrations du modèle, et les auteurs n'y font pas référence lorsqu'il s'agit d'établir des relations mathématiques entre les différentes grandeurs mises en jeu. Si les auteurs concluent ce document en soulignant que le tracé de la dernière chaîne (Figure 39) rend possible « la comparaison de l'énergie fournie par la source et l'énergie cinétique "utile" », ils n'expliquent pas de quelle manière utiliser la chaîne pour effectuer cette comparaison.

Caractéristiques de l'énergie mobilisées

Peu de caractéristiques de l'énergie sont évoquées dans cette activité, et certaines ne sont mentionnées que dans les chaînes énergétiques ; c'est le cas de la conversion⁸² et de la transformation⁸³ de l'énergie. Les formes d'énergie *thermique* et *mécanique* apparaissent sur des

81 Au chapitre 2, nous avons souligné une grande diversité de définitions pour les formes d'énergie ; néanmoins, le fait d'associer les formes d'énergie thermique et mécanique à un système fait consensus.

82 Nous avons aussi relevé l'expression « convertir l'énergie fournie en énergie "utile" ».

83 Mentionnée une fois, pour introduire la représentation par les chaînes énergétiques.

chaînes, où elles semblent confondues avec des transferts. Elles ne sont mentionnées nulle part ailleurs dans le document, où seule la forme *cinétique* de l'énergie est évoquée.

La puissance est présentée comme une grandeur associée à un moteur (ou à un véhicule), et non à un transfert d'énergie.

Les transferts d'énergie ne sont pas mentionnés – et le verbe « transférer » n'est jamais utilisé.

Nous en déduisons que le modèle scientifique scolaire de l'énergie mobilisé n'opère pas de distinction entre *transferts* d'énergie et *formes* d'énergie.

La dissipation d'énergie et les frottements (que nous relient à la propriété de *dégradation* de l'énergie) sont largement pris en considération dans la construction progressive du modèle qui permet de répondre à la question posée. Dans un premier temps, la dégradation de l'énergie est négligée, puis elle est présentée comme liée à la fois aux « pertes » d'énergie expliquant les écarts entre les prévisions de durée issues de la modélisation et de l'expérimentation, et à la maximisation de l'efficacité de conversion du moteur.

Le principe de conservation de l'énergie n'est pas évoqué, mais son utilisation reste nécessaire pour résoudre le problème posé. Nous considérons donc qu'il fait *implicitement* partie de ce modèle.

9.4. « Quel volume de boisson au cola compense les dépenses d'énergie d'un cycliste faisant l'ascension du Mont Ventoux ? »

Objectifs et description de l'activité

Cette activité est une « tâche complexe », au cours de laquelle les élèves doivent déterminer quel volume de boisson au cola compense les dépenses d'énergie d'un cycliste faisant l'ascension du Mont Ventoux.

Pour ce faire, ils disposent des informations suivantes :

- certaines caractéristiques du cycliste (date de naissance, couleur des cheveux et des yeux, taille, masse) et de son vélo (masse) ;
- certaines caractéristiques de l'ascension du Mont Ventoux (situation géographique, altitude, dénivelé, distance du parcours, pente moyenne) ;
- une définition et une formule permettant de calculer les dépenses énergétiques liées au « métabolisme de base » ;
- une estimation du rendement des muscles (proportion de l'énergie reçue par les muscles convertie en « énergie mécanique ») ;
- une estimation du rendement des aliments (proportion de l'énergie chimique contenue dans un aliment ingéré utilisable par le corps) ;
- la photographie d'une étiquette qui indique l'énergie contenue dans certains volumes de boisson au cola (100mL et 330mL) ;
- la formule donnant l'« énergie de position en fonction de l'altitude » ;
- un graphique représentant « l'énergie dépensée pendant 2 heures pour lutter contre les frottements de l'air et de la route en fonction de la vitesse moyenne du cycliste ».

Les auteurs du document soulignent que l'activité est délicate, et proposent une démarche de résolution parmi d'autres « possibles », en listant de nombreuses questions à poser aux élèves pour les aider à avancer dans leur travail. Les résultats numériques associés aux différentes étapes-clé de la résolution de l'activité sont fournis (par exemple : « La formule du métabolisme de base (...) permet de calculer l'énergie nécessaire au métabolisme sur 24 heures, soit 660 kJ pour 2 heures. » ; « Énergie pour lutter contre la résistance de l'air : calcul de la vitesse moyenne et exploitation du graphique (11,3 km/h, 190 kJ). » ; « Une fois l'énergie que doivent fournir les muscles est déterminée (1650 kJ), le calcul de l'énergie nécessaire aux muscles peut être fait en utilisant des règles de proportionnalité. »)

Caractéristiques de l'énergie mobilisées

La structure de cette activité ne fait pas apparaître clairement les caractéristiques de l'énergie qui doivent être mobilisées par les élèves pour répondre à la question qui leur est posée :

- les données sont présentées ;
- des pistes d'aide à la résolution dans un contexte de classe sont formulées ;
- les différentes étapes de résolution sont évoquées et les résultats numériques sont fournis (sans justification particulière) ;
- des conseils d'ordre pédagogique sont donnés.

Certaines formes d'énergie sont mentionnées : l'énergie chimique, contenue dans les aliments, et l'énergie (potentielle de) position, dite « énergie pour le changement d'altitude ».

Les énergies thermique et mécanique sont évoquées dans l'énoncé (à une seule reprise), et les auteurs leur donnent le sens de *transfert* plus que de *forme d'énergie* ; les verbes *convertir* et *transformer* semblent comme synonymes : « Sur 100 kJ d'énergie reçue par les muscles, seuls 30 kJ seront convertis en énergie mécanique, le reste est transformé en énergie thermique ».

Comme dans l'activité décrite à la section précédente, le principe de conservation de l'énergie n'est pas évoqué, mais son utilisation est nécessaire pour résoudre cette tâche complexe : il fait *implicitement* partie du modèle scolaire de l'énergie que nous décrivons.

Le recours aux chaînes énergétiques – ou à tout autre type de représentation schématique pour les phénomènes énergétiques – n'est pas envisagé pour permettre ou pour faciliter la résolution de cet exercice.

9.5. Conclusion

Dans les propositions de progression, le concept scientifique scolaire d'énergie reprend les caractéristiques que le programme lui attribue, sans en préciser le sens en général. Lorsqu'il est précisé, ce sens n'est pas celui que l'on rencontre habituellement en sciences, en particulier en ce qui concerne le principe de conservation de l'énergie, qui est présenté exclusivement sous sa forme locale, et est utilisé de façon implicite dans les activités. Le concept *sociétal* et le concept *scientifique* scolaire d'énergie coexistent, sans que les auteurs des propositions de progression précisent s'il s'agit de deux concepts distincts qui présentent certaines ressemblances et certaines différences, ou de deux concepts qui forment un ensemble cohérent.

Comme le suggèrent les propositions de progression, les trois activités contextualisent l'énergie, mettant ce concept en lien avec des objets et des activités du quotidien (bouilloire, voiture, moto, cyclisme, boisson au cola). Elles ne sont toutefois pas orientées sur la formation du citoyen et sur le « défi énergétique ».

Ce sont des activités de modélisation *mathématique* : leur résolution se fait par la détermination d'une ou plusieurs valeurs numériques. Elles impliquent l'utilisation de formules, qui sont données dans les énoncés (énergie cinétique, énergie potentielle, puissance...), et font appel aux caractéristiques *quantitatives* de l'énergie.

Les autres propriétés de l'énergie sont rarement mentionnées, et ne sont jamais définies. Les transferts d'énergie ne font pas partie des modèles scientifiques scolaires que nous avons mis en évidence. Dans l'ensemble de ces documents d'accompagnement, nous avons relevé une assimilation entre *formes* et *transferts* d'énergie, et entre *transformation* et *conversion* d'énergie.

Seule une des trois activités analysées mentionne et demande de construire des chaînes énergétiques. Ces représentations sont essentiellement illustratives, et ne répondent pas à des règles de modélisation claires. Nous posons l'hypothèse que la faible portée explicative et heuristique de ces chaînes est liée à l'absence de règles claires de modélisation qui les sous-tendent.

10. Modèles scolaires de l'énergie dans les manuels scolaires de Cycle 4

Les sept manuels que nous avons analysés traitent successivement les quatre thèmes dans l'ordre prévu par le programme de physique-chimie ; nous n'y avons pas remarqué de référence au concept d'énergie ailleurs que dans le thème *L'énergie et ses conversions*.

Pour ce thème, deux livres (Bordas Espace et Hachette Éducation) suivent le découpage prévu par le programme, en séparant la partie relative à l'énergie de celle qui concerne l'électrocinétique. Les cinq autres manuels proposent une alternance entre ces deux parties : Nathan, Lelivrescolaire.fr, Hatier et Magnard commencent par un ou plusieurs chapitres de la partie *Énergie*, traitent la partie relative à l'électrocinétique, puis consacrent à nouveau plusieurs chapitres à l'énergie ; Bordas R-V propose une alternance plus large entre les deux parties.

Le manuel Hachette Éducation ne propose pas de découpage en *chapitres* mais en *modules*. Le thème *L'énergie et les conversions* est composé de deux modules, qui correspondent aux deux parties du programme.

Les chapitres (ou modules) sont composés d'activités (au sens courant), suivies de résumés de cours (pouvant être appelés « bilans », « cours », « l'essentiel »...) puis d'exercices, dont le volume est variable selon les éditeurs (Tableau 6).

manuel	nb de pages "activités"	nb de pages "cours"	nb de pages "exercices"	nb de pages par chapitre (ou module)
Bordas R-V	2	1,5	4,5	10
Bordas Espace	4	2	5	12
Lelivrescolaire.fr	4	2	6	14
Hachette	14 à 21	3 à 4	24 à 26	42 à 52
Hatier	6	2	4	14
Magnard	8 à 11	3	9 à 11	22 à 28
Nathan	2	1	7	10

Tableau 6: nombre de pages dédiées aux activités, bilans de cours et exercices par chapitre selon les manuels

Dans ce chapitre, nous allons présenter successivement⁸⁴ les modèles scolaires de l'énergie proposés dans chaque manuel par l'analyse des parties de cours et des fiches méthode associées aux chaînes énergétiques⁸⁵ ; nous relèverons aussi les définitions liées à l'énergie qui figurent dans les lexiques de certains manuels.

Dans la dernière section (§10.8, p.222), nous proposons une synthèse générale de l'ensemble des modèles que nous avons identifiés.

(Remarque : Les mises en gras et les italiques dans les citations qui figurent dans ce chapitre ont été faites par les auteurs des manuels.)

84 Par ordre alphabétique des maisons d'édition.

85 Le chapitre suivant sera consacré à l'analyse des tâches qui mettent en jeu des chaînes énergétiques au sein des exercices qui figurent dans ces manuels.

10.1.Manuel Bordas Espace (*Brun et al., 2017*)

Nous avons procédé à l'analyse des parties de cours relatives à l'énergie associées aux chapitres suivants :

- C20 : Sources, transferts et conversions d'énergie (cours p.246-247)
- C21 : Température, chaleur et énergie thermique (cours p.258-259)
- C22 : Énergie cinétique et énergie potentielle (cours p.270-271)
- C23 : Énergie chimique (cours p.282-283)
- C24 : Énergie lumineuse (cours p.294-295)
- C25 : Énergie nucléaire (cours p.306-307)
- C29 : Relation tension-courant : loi d'Ohm (cours p.354-355)
- C30 : Puissance et énergie électriques (cours p.366-367)

Caractéristiques de l'énergie et éléments spécifiques au modèle

Les auteurs du manuel Bordas Espace ne proposent pas de définition pour l'énergie. Cependant, nous relevons que la première phrase qu'ils utilisent pour parler d'énergie – qui pourrait s'apparenter à un germe de définition – présente ce concept sous un angle plus sociétal que scientifique :

« L'énergie est indispensable à la vie, elle est responsable des phénomènes naturels et permet le fonctionnement des objets. » (C20)

Formes d'énergie

Les différentes formes attribuées à l'énergie sont un élément majeur du modèle scientifique scolaire proposé : elles sont listées et explicitées dans le premier chapitre du thème, puis un chapitre est centré sur chacune d'entre elles. Les formes d'énergie mentionnées au premier chapitre (C20) sont les énergies cinétique, thermique, chimique, électrique et lumineuse. Des « sources d'énergie » et des « manifestations » leur sont associées (Figure 40). Par la suite, apparaîtront les énergies potentielle (C22) et nucléaire (C25).

Ces formes d'énergie sont définies dans les chapitres qui leur sont associés :

- L'énergie thermique est l'« énergie associée à l'**agitation** des entités microscopiques », elle peut être « absorbée » au cours d'une fusion ou d'une vaporisation ou « libérée » au cours d'une solidification ou d'une liquéfaction (C21).
- Au chapitre 22 sont données les définitions des énergies cinétique et potentielle : « Un objet en mouvement possède une énergie de mouvement appelée **énergie cinétique**. » ; « Un objet placé en altitude possède une énergie de position appelée **énergie potentielle**. » L'expression littérale de l'énergie cinétique est donnée peu après ces définitions.
- L'énergie chimique est définie au chapitre 23 comme « l'énergie associée aux transformations chimiques. Elle se **convertit** en d'autres formes d'énergie. »
- Les énergies lumineuse et nucléaire sont définies aux chapitres 24 (« L'**énergie lumineuse** est une forme d'énergie qui se manifeste par de la lumière. ») et 25 (« L'**énergie nucléaire** est une forme d'énergie liée aux transformations nucléaires. »).

- Le chapitre 30 est consacré à la puissance et à l'énergie électriques. L'énergie électrique qui est mentionnée est systématiquement qualifiée de « consommée ». Elle « correspond à la puissance consommée par un appareil électrique pendant une certaine durée. En électricité, son unité courante est le **kilowattheure (kWh)**. L'énergie électrique consommée par un appareil électrique est proportionnelle à sa puissance et à sa durée de fonctionnement. »

À partir du troisième chapitre (C22), les auteurs présentent l'énergie comme une grandeur physique, en lui attribuant une unité : « le joule, de symbole J » (C22, C23). Certaines formes d'énergie (chimique, lumineuse, thermique, « électrique consommée », cinétique...) sont évoquées dans des expressions littérales (C22, C24, C30). L'énergie électrique est présentée comme une grandeur mesurable à l'aide d'un compteur électrique et calculable (C30).

Sources d'énergie

Les auteurs associent des formes d'énergie à des sources d'énergie, par un tableau que nous avons reproduit à la Figure 40 (C20).

Figure 40: sources, formes et manifestations de l'énergie (Bordas Espace, p.246)

Ils définissent une source d'énergie comme « un objet ou un phénomène susceptible de fournir de l'énergie » (C20) et distinguent les sources d'énergie renouvelables (exemples : Soleil, biomasse, eau, vent), qui se renouvellent « plus vite qu'une vie humaine » et dont « les stocks ne s'épuisent pas » des sources d'énergie non renouvelables (exemples : combustible nucléaire, pétrole, charbon, gaz), qui « ont été formées pendant des milliers, voire des centaines de millions d'années. » (C20)

Nous soulevons la question de la cohérence entre cette définition et l'évocation de certaines sources dans le tableau (Figure 40), en particulier le radiateur, le feu et la prise de courant.

Par ailleurs, au chapitre 24, l'évocation de « sources primaires de lumière » et leur représentation sur des chaînes énergétiques nous conduit à nous demander dans quelle mesure ces sources sont assimilées à des sources d'énergie par les auteurs (Figure 41).

Figure 41: illustration des "sources primaires de lumière" (Bordas Espace, p.294)

Transfert d'énergie

Dans le premier chapitre (C20), les auteurs définissent les transferts d'énergie : « Lorsque l'énergie garde la même forme mais passe d'un objet à un autre, on parle de **transfert d'énergie**. » Ils associent à cette définition une représentation graphique : une flèche sur laquelle est écrit « forme d'énergie » (Figure 42). Au C21, ils définissent le transfert thermique comme « le transfert de l'énergie thermique ». Ils précisent qu'il « est appelé **chaleur** » et qu'il en existe trois modes : conduction, convection, rayonnement, qu'ils décrivent brièvement.

Les transferts d'énergie ne sont pas mentionnés dans les autres chapitres – à l'exception du chapitre 25, nous y reviendrons dans le paragraphe dédié aux chaînes énergétiques – où les auteurs parlent exclusivement de formes d'énergie, qui, dans leur modèle, englobent le plus souvent les transferts d'énergie.

Conversion et transformation de l'énergie

Dès le chapitre 20, les auteurs définissent les conversions d'énergie en leur donnant le sens d'une transformation d'énergie : « Lorsque l'énergie passe d'une forme à une autre dans un même objet, on parle de **conversion d'énergie**. »

Cependant, les exemples associés à cette définition renvoient au sens que nous donnons au mot conversion : il s'agit d'une éolienne qui convertit de l'énergie cinétique en énergie électrique et d'une bouilloire qui convertit de l'énergie électrique en énergie thermique.

Dans leur modèle, les auteurs ne distinguent pas *transfert* et *forme* d'énergie : un changement de mode de transfert est alors assimilé à un changement de forme d'énergie, et une conversion est assimilée à une transformation. Nous remarquons qu'ils considèrent que l'énergie cinétique et l'énergie électrique sont des attributs de l'objet « éolienne », et que l'énergie électrique et l'énergie thermique sont des attributs de l'objet « bouilloire », ce qui semble en contradiction avec les définitions qu'ils donnent aux formes *thermique* et *électrique* de l'énergie (voir ci-avant).

Dans le chapitre 22, consacré aux formes cinétique et potentielle de l'énergie, le mot « conversion » est utilisé pour décrire le passage de l'énergie potentielle à l'énergie cinétique (et inversement) au sein d'un objet.

Au chapitre 23, les auteurs mentionnent plusieurs conversions mettant en jeu de l'énergie chimique, qui impliquent à la fois des formes et des transferts d'énergie :

- de l'énergie chimique en énergie lumineuse (associée à une photo d'objets de type bracelets lumineux) ;
- d'énergie lumineuse en énergie chimique (associée à une photo de plante verte) ;
- d'énergie chimique en énergie électrique (associée aux piles et batteries) ;
- d'énergie électrique en énergie chimique (associée à une batterie en charge) ;
- d'énergie chimique en énergie thermique et lumineuse (associée à une combustion).

De la même manière, au chapitre 25, il est question de la conversion d'énergie nucléaire en énergie lumineuse et en énergie thermique dans les étoiles.

Conservation de l'énergie

La conservation de l'énergie est mentionnée à plusieurs reprises, et ce dès le premier chapitre (C20) – avant que l'énergie soit présentée comme une grandeur : « L'énergie est transférée ou convertie mais **elle ne disparaît jamais**. Il n'est donc pas correct de parler de **production ou de pertes d'énergie**. »

Le chapitre 22 mentionne la conservation de l'énergie *sous certaines conditions*. Il y est question de la conservation de l'énergie « totale », nom donné à l'énergie mécanique : « Conservation de l'énergie totale : Si aucune autre conversion d'énergie n'a lieu, l'**énergie totale** (énergie cinétique + énergie potentielle) de l'objet **se conserve**. » Par la suite, il est précisé que « lors d'un freinage, l'énergie cinétique est en partie convertie en énergie thermique et donc l'énergie totale de la voiture diminue. Une partie de cette énergie est transférée à l'environnement extérieur. »

Au chapitre 24, deux expressions littérales sont associées à la « conservation de l'énergie » en lien avec des « sources primaires de lumière » :

$$E_{\text{chimique}} = E_{\text{lumineuse}} + E_{\text{thermique}} \text{ et}$$

$$E_{\text{électrique}} = E_{\text{lumineuse}} + E_{\text{thermique}}.$$

Elles peuvent être lues comme :

« énergie chimique cédée par la lampe à huile, la bougie ou le gaz = énergie lumineuse émise⁸⁶ par la lampe à huile, la bougie ou le gaz + énergie thermique⁸⁶ émise par la lampe à huile, la bougie ou le gaz » *pendant une certaine durée*, et

« énergie électrique⁸⁶ issue de la lampe électrique, de la diode ou du laser = énergie lumineuse⁸⁶ émise par la lampe, la diode ou le laser + énergie thermique⁸⁶ émise par la lampe, la diode ou le laser » *pendant une certaine durée*.

L'ajout de ces précisions nous semble nécessaire pour une bonne compréhension de ces expressions, qui ont une dimension temporelle et qui mettent en jeu à la fois des formes d'énergie

86 Comme dans les sections qui suivront, nous reprenons les termes utilisés par les auteurs du manuel, qui attribuent aux transferts énergétiques lumineux (resp. thermiques, électriques) une forme d'énergie : l'énergie lumineuse (resp. thermique, électrique). Nous ne discutons pas ici de la pertinence de ce choix.

associées à des systèmes et d'autres formes d'énergie, non attribuables à des systèmes, assimilables à des transferts (auxquelles les auteurs attribuent une forme).

Nous relevons aussi que le chapitre qui parle de puissance et d'énergie électrique (C30) présente l'énergie électrique comme une grandeur qui se consomme, ce qui peut être considéré comme incohérent avec le principe de conservation de l'énergie⁸⁷.

Puissance

Dans ce manuel, la puissance est évoquée à deux reprises :

- dans le chapitre relatif à l'énergie lumineuse (C24), où la « puissance lumineuse » est définie comme l'« énergie lumineuse émise en une seconde » ;

- dans le chapitre relatif à la puissance électrique (C30), où il est question de « puissance nominale d'un appareil électrique » et de « puissance totale consommée par une installation électrique ». La puissance électrique est associée à un appareil électrique ou à un transfert lié à une consommation d'énergie (*notre soulignage*). Il est dit que « plus un appareil a une puissance élevée, plus il consomme rapidement de l'énergie électrique ». L'expression littérale qui lie puissance électrique, énergie électrique et durée est donnée.

Prise en compte de la dégradation de l'énergie

Dans ce manuel, les auteurs recommandent de ne pas parler de « pertes » d'énergie et soulignent que l'énergie ne peut être ni produite, ni perdue. Ils n'associent pas l'idée de « pertes » d'énergie à un principe de la physique. (C20 : « L'énergie est transférée ou convertie mais **elle ne disparaît jamais**. Il n'est donc pas correct de parler de **production ou de pertes d'énergie**. »)

Dans le chapitre 21, les auteurs précisent que les transferts thermiques sont orientés :

« Le **transfert thermique** est le transfert de l'énergie thermique. il ne peut se faire que de la **source chaude vers la source froide**. »

Au chapitre 29, l'effet Joule est évoqué, mais n'est pas mis en relation avec l'idée de dégradation :

« Moins le matériau est conducteur, plus sa **résistance** est grande et plus il s'échauffe quand il est traversé par du courant. De l'énergie électrique est convertie en énergie thermique : c'est l'**effet Joule**. »

Représentations des phénomènes énergétiques par des chaînes énergétiques

Dans ce manuel, les phénomènes énergétiques sont largement représentés par des chaînes énergétiques, que l'on retrouve dans la plupart des doubles-pages de cours.

Ces chaînes représentent des transferts d'énergie entre objets et des conversions d'énergie « au sein d'objets », conformément à la définition qui leur est donnée. Dès le premier chapitre du thème,

87 Il y a, selon nous, une ambiguïté : dire que l'énergie électrique « se consomme » peut être entendu soit comme une disparition de l'énergie (ce qui n'est pas correct d'un point de vue scientifique), soit comme une diminution d'une forme particulière d'énergie (ce qui est scientifiquement valable si l'on considère qu'il existe une forme « électrique » de l'énergie).

les règles qui les régissent sont exposées, à la suite des définitions des transfert et conversion d'énergie (Figure 42) :

- un objet est représenté dans un rectangle coloré ;
- s'il subit une conversion d'énergie, elle est représentée par une flèche à l'intérieur du rectangle, qui part du nom de la forme d'énergie initiale et pointe vers le nom de la forme d'énergie finale ;
- si un transfert a lieu entre deux objets, les rectangles qui les représentent sont reliés par une flèche (qui part du rectangle associé à l'objet émetteur et va vers l'objet récepteur) sur laquelle est inscrit le nom de la « forme d'énergie transférée ».

Figure 42: définition et représentation des transfert et conversion d'énergie (Bordas Espace, p.247)

Les chaînes énergétiques associées à une situation mettant en jeu plusieurs objets sont obtenues par associations de chaînes de transfert et de conversion. Ces règles sont reprises dans la fiche méthode proposée en fin de manuel (Figure 43) et dans la chaîne associée à une centrale nucléaire présentée au chapitre 25 (Figure 44).

Figure 43: fiche méthode pour l'établissement d'une chaîne énergétique (Bordas Espace, p.474)

Figure 44: chaîne énergétique associée à une centrale nucléaire (Bordas Espace, p.307)

Nous constatons que ces chaînes représentent exclusivement les caractéristiques de transfert et de conversion de l'énergie telles qu'elles ont été définies par les auteurs du manuel, ainsi que les noms donnés aux formes d'énergie. La notion de système n'est pas abordée, et les échanges énergétiques sont uniquement envisagés entre plusieurs *objets*.

La non-distinction entre mode de transfert et forme d'énergie est mise en évidence dans ces deux chaînes : tous les transferts représentés sont identiques aux formes d'énergie « obtenues » dans l'objet qui les précède et à celles « fournies » à l'objet qui leur succède. Nous remarquons que les auteurs ont choisi de représenter des situations dans lesquelles toutes les formes d'énergie sont assimilables à un transfert. Nous ne savons pas quelle représentation serait choisie, par exemple, pour décrire une situation mettant en jeu de l'énergie chimique ou nucléaire (auxquelles aucune forme de transfert n'est *a priori* intuitivement associable).

Les questions de la nature et de la représentation de l'objet de début de chaîne ne sont pas évoquées, (par exemple, pour la chaîne associée à la dynamo, Figure 43 : pourquoi aucune conversion ne lui est associée ? pourquoi n'y a-t-il pas une « main » pour faire tourner la manivelle ?), tout comme celle du rôle de l'objet représenté en fin de chaîne (la lumière est-elle « stockée » par la lampe ? l'énergie électrique est-elle « stockée » par l'alternateur ? si elles sont transmises à un autre objet, pourquoi n'est-il pas représenté ?) La question de la non-représentation de la vapeur d'eau sur la chaîne associée à la centrale nucléaire (Figure 44) se pose également. Nous posons l'hypothèse que, puisqu'il ne s'agit pas d'un *objet* au sens strict, elle n'a pas à être représentée sur une chaîne.

Autres représentations pour les phénomènes énergétiques

Les chaînes énergétiques sont présentes dans tous les chapitres associés à une forme d'énergie, à l'exception de ceux qui concernent l'énergie thermique (C21 – Température, chaleur et énergie thermique) et l'énergie en mécanique (C22 – Énergie cinétique et énergie potentielle).

Dans le chapitre 21, les auteurs expliquent la différence entre transfert thermique et énergie thermique, qu'ils n'illustrent pas par les chaînes dont nous venons d'explicitier les règles de fonctionnement. Ils proposent une autre représentation pour les transferts thermiques, reproduite ci-après (Figure 45).

Figure 45: chaîne représentant un transfert thermique (Bordas Espace, p.258)

Dans le chapitre associé à la mécanique, les transformations d'énergie (appelées « conversions » par les auteurs) sont représentées par des diagrammes en bâtons assimilables à des chaînes avant-après (Figure 46). Elles sont également représentées par un graphique. Ces représentations ne sont pas commentées et ne sont pas associées à une méthodologie particulière, mais l'ensemble de diagrammes en bâtons pourrait être assimilé à une chaîne de type *avant-après*, reposant sur et illustrant les caractéristiques de transformation et de conservation de l'énergie.

Figure 46: représentations associées à l'énergie dans le chapitre 22 - énergie potentielle et énergie cinétique (Bordas Espace, p.271)

Conclusion de section

Le modèle scientifique scolaire de l'énergie proposé dans ce manuel repose sur la distinction entre formes, transferts et conversions de l'énergie, qui sont définis dès le premier chapitre et mobilisés pour le tracé de chaînes énergétiques, qui mettent en relation différents domaines de la physique. Ces chaînes ne sont utilisées ni pour la représentation des transformations en mécanique, ni pour mettre en évidence la distinction entre énergie thermique et transfert thermique – ce à quoi un chapitre du manuel est pourtant consacré.

Nous avons remarqué que, bien que transferts et conversions aient été définis, le sens qui leur est donné n'est pas toujours clair. Les transferts d'énergie portent le nom de formes d'énergie (par exemple : « transfert de l'énergie thermique », voire « énergie thermique » sur une flèche de transfert). Nous avons remarqué que les chaînes énergétiques de type « transfert » proposées par les auteurs mettent en jeu exclusivement des formes d'énergie intuitivement assimilables à des transferts : l'énergie cinétique est associée au travail mécanique, l'énergie thermique est associée au transfert thermique, et l'énergie électrique est associée au travail électrique. Les formes chimique et nucléaire de l'énergie ne peuvent pas être représentées sur ces chaînes. Par ailleurs, bien que les transformations soient considérées comme des conversions, nous remarquons qu'elles ne sont pas représentées par des chaînes énergétiques. Une esquisse de chaînes de type *avant-après* est proposée pour leur représentation.

Les auteurs ne proposent pas de mise en relation entre le vocabulaire de la vie courante et le vocabulaire scientifique. Ils évoquent les « pertes » d'énergie, jugées non conforme au modèle scientifique scolaire qu'ils proposent, mais ne discutent pas du sens qui leur est attribué dans la société. Certains objets comme les prises électriques ou les radiateurs sont considérés comme des sources d'énergie, évoquées dans un sens plus sociétal que scientifique.

10.2.Manuel Bordas Regaud-Vento⁸⁸ (*Bélanger et al., 2017*)

Nous avons procédé à l'analyse des parties de cours relatives à l'énergie associées aux chapitres suivants :

- C20 : Les énergies renouvelables et non renouvelables (cours p.218-219)
- C25 : Conversion et transfert d'énergie électrique (cours p.268-269)
- C26 : Énergies cinétique et potentielle (cours p.278-279)
- C30 : Énergie électrique et effet Joule (cours p.318-319)
- C31 : Énergie nucléaire (cours p.328-329)
- C32 : Transferts d'énergie (cours p.338-339)

Pour chaque chapitre, ces pages de cours sont composées de deux paragraphes (occupant une page complète) et d'un schéma-bilan (sur une demi-page).

Caractéristiques de l'énergie et éléments spécifiques au modèle

Les auteurs du Bordas R-V définissent l'énergie comme la « grandeur servant à mesurer la capacité d'un système à produire du mouvement, de la chaleur ou de la lumière » et ajoutent que « son unité SI est le **joule** (de symbole **J**) » (Bordas R-V, lexique, p.431).

Ils présentent donc l'énergie comme une grandeur associée à un système et font implicitement référence à certains modes de transfert qui lui sont associés (mouvement, chaleur et lumière).

Cependant, le titre du chapitre 20 – « Les énergies renouvelables et non renouvelables » – nous indique que, pour ces auteurs, le mot « énergie » peut être utilisé comme synonyme de « source d'énergie » : il y a coexistence entre le vocabulaire de la vie courante et le vocabulaire scientifique.

Formes d'énergie

Plusieurs formes d'énergie sont mentionnées tout au long des chapitres, mais elle ne sont pas présentées ensemble, dans un même élément de cours.

Dans le premier chapitre (C20), on parle d'« énergie électrique », « produite » par une « centrale électrique », et d'« énergie de mouvement ou mécanique », convertie par un alternateur « en énergie électrique ». Dans le chapitre suivant (C25) sont mentionnées les énergies *thermique*, *chimique* (associée aux piles), *lumineuse* (associée aux panneaux solaires) et *électrique* (« de la prise »).

Les chapitres 25 et 26 se focalisent sur certaines formes d'énergie, qui y sont décrites comme des grandeurs calculables :

- L'énergie cinétique « dépend de la **vitesse** et de la **masse** de l'objet » et est « donnée par la relation $E_c = \frac{1}{2} m \cdot v^2$ » (C26)
- « Un objet placé en hauteur possède une énergie, appelée **énergie potentielle**. L'énergie potentielle dépend de la **position** et de la **masse** de l'objet. Elle est donnée par la relation : $E_p = m \cdot g \cdot h$ » (C26)

88 Noté « Bordas R-V » par la suite.

- « L'**énergie mécanique** est la somme de l'énergie cinétique et de l'énergie potentielle : $E_m = E_c + E_p$ » (C26)
- « L'**énergie électrique** consommée est mesurée par un compteur ». Les auteurs expliquent comment la calculer à l'aide des indications qui figurent sur le compteur, puis donnent la relation mathématique entre « énergie électrique consommée », « puissance nominale d'un appareil électrique » et durée d'utilisation de cet appareil (C30).

Pour chaque expression littérale sont indiquées les unités associées à chaque grandeur.

Le chapitre 31 est consacré à l'énergie nucléaire, définie comme « l'énergie disponible dans le noyau d'un atome » (C31).

Les définitions des énergies cinétique et mécanique qui figurent dans le lexique sont comparables à celles que nous avons trouvées dans le cours, cependant d'autres définitions sont données pour certaines formes d'énergie :

- « Énergie chimique : énergie associée aux liaisons entre les atomes au sein des molécules ou entre les ions. » (Bordas R-V, lexique, p.431)
- « Énergie électrique : énergie reçue par un dipôle traversé par un courant électrique ; sa valeur s'exprime en **joule** (de symbole **J**) dans le SI, et en **kWh** pour un appareil domestique. » (Bordas R-V, lexique, p.431)
- « Énergie potentielle : énergie possédée par un corps du fait de sa position. » (Bordas R-V, lexique, p.432)
- « Énergie thermique : terme de physique désignant de la "chaleur stockée." » (Bordas R-V, lexique, p.432) ; la chaleur étant définie comme « mode de transfert d'énergie d'un corps à un autre, du corps le plus chaud vers le corps le plus froid » (Bordas R-V, lexique, p.430)

Ces définitions réunissent à la fois des formes d'énergie, associées à des systèmes – ce qui est cohérent avec la définition donnée pour l'énergie – et des quantités d'énergie échangées entre systèmes – en particulier, l'énergie électrique (nous n'avons pas pu interpréter avec certitude la définition proposée pour l'énergie thermique).

Conversion d'énergie

Les conversions d'énergie sont mentionnées dans la plupart des chapitres que nous avons analysés (C20, C25, C30), mais ne sont pas définies. Cependant, nous avons relevé dans le lexique une définition pour « convertisseur d'énergie » : « dispositif transformant une forme d'énergie en une autre forme d'énergie. » (Bordas R-V, lexique, p.430) Les formes et transferts d'énergie n'étant pas clairement identifiés dans ce modèle, il n'est pas possible de savoir si cette définition, qui ne fait pas appel à la notion de système, fait référence à des conversions d'énergie (en lien avec des transferts, extérieurs au système), ou à des transformations d'énergie (intérieures au système).

Les exemples de conversions que nous avons relevés montrent qu'elles mettent en jeu soit des transferts, soit à la fois un transfert et une forme d'énergie, soit deux formes d'énergie :

- « Conversion d'énergie réalisée dans une centrale » (C20)
- « L'**alternateur** (...) **convertit** l'énergie du mouvement en énergie électrique. » (C20)
- « Conversion d'une forme d'énergie en énergie électrique » (C25)

« Dans une pile en fonctionnement, de l'énergie chimique est **convertie** en énergie électrique **transférée** au circuit. La pile est un **convertisseur** d'énergie chimique en énergie électrique. » (C25)

« De l'énergie électrique peut aussi être produite par **conversion** d'une autre forme d'énergie, comme de l'énergie mécanique ou thermique. Dans le cas des panneaux solaires, de l'énergie lumineuse est convertie en énergie électrique. » (C25)

« Une lampe convertit de l'énergie électrique en énergie lumineuse et en énergie thermique. » (C25)

« L'énergie électrique consommée par une résistance (...) est convertie en énergie thermique. » (C25)

« Lors d'une chute, l'objet perd de l'altitude et gagne de la **vitesse**. L'**énergie potentielle** est convertie en **énergie cinétique**. » (C26)

« Par effet Joule, l'énergie électrique consommée par la résistance est convertie intégralement en énergie thermique. » (C30)

« L'**énergie nucléaire** produite par la fission est convertie en énergie thermique. » (C31)

« L'alternateur convertit cette énergie mécanique en énergie électrique. » (C31)

Transferts d'énergie

Le dernier chapitre du thème *L'énergie et ses conversions* s'intitule « Transferts d'énergie » (C32). En dehors de ce chapitre, les transferts d'énergie sont rarement évoqués dans ce manuel scolaire. Une occurrence a été trouvée au chapitre 25, dont le second paragraphe de cours s'intitule : « Transfert d'énergie électrique d'un générateur à un récepteur », mais dans lequel les transferts ne sont mentionnés qu'à la dernière phrase : « Dans un circuit électrique, un générateur transfère de l'énergie électrique vers les différents récepteurs du circuit. Si ce transfert d'énergie vers un récepteur est correct, le générateur et le récepteur sont adaptés. »

Le cours du chapitre 32 est composé de deux paragraphes : le premier s'intitule « transferts thermiques » et le second « bilan énergétique ».

Les transferts thermiques sont définis par la phrase :

« Lorsque deux objets ayant des températures différentes sont en contact, un **transfert thermique**, appelé plus couramment **chaleur**, s'effectue de l'objet le plus chaud vers l'objet le plus froid. »

Les modes de transfert thermiques (conduction, convection et rayonnement) sont ensuite brièvement évoqués. Cette définition est cohérente avec celle trouvée dans le lexique : « transfert thermique (ou chaleur⁸⁹) : mode de transfert d'énergie pouvant s'effectuer selon trois modes : conduction (...), convection (...), rayonnement. » (Bordas R-V, lexique, p.435)

Le paragraphe suivant présente les « bilans énergétiques » par un exemple : l'énergie électrique reçue par un mixer est « transférée sous forme d'énergie mécanique correspondant à de l'énergie utile », tandis que « l'autre partie est dissipée sous forme de pertes énergétiques, dans ce cas la chaleur » (C32).

89 Cette définition est différente de celle donnée pour chaleur, évoquée précédemment.

Conservation de l'énergie

La première évocation de la conservation de l'énergie est faite au chapitre 26, où il est indiqué qu'« en l'absence de frottements, l'énergie mécanique d'un objet en mouvement est constante. »

La seconde mention de la conservation de l'énergie est faite au chapitre 32 et accompagne le « bilan d'énergie d'un mixer » « $E_{re\grave{c}ue} = E_{utile} + E_{perdue}$ », en relation avec la Figure 47 : « L'énergie d'un système **se conserve**. » L'interprétation de cette phrase est délicate : du point de vue de la physique, l'énergie d'un système ne se conserve pas *a priori*. L'expression littérale qu'elle accompagne semble mettre en évidence l'égalité entre l'énergie reçue *pendant une certaine durée* par un système et les énergies transférées par ce système *pendant la même durée*, décomposées en transferts utile et inutile « perdu ». Dans ce cas, le système considéré présente la particularité de ne pas subir de variations d'énergie. Il s'agit d'une vision restreinte du principe de conservation de l'énergie.

Production et consommation d'énergie électrique

Tout au long du thème, l'énergie électrique est présentée comme pouvant être produite (dans les centrales électrique, C20, C25, C31) et consommée (plusieurs occurrences au C30 pour « consommation électrique » et « énergie électrique consommée »).

Les auteurs ne précisent pas quels sens ils donnent à ces mots et ne les mettent pas en lien avec le concept scientifique scolaire d'énergie ou avec le concept sociétal d'énergie.

Sources d'énergie

Au chapitre 20, les auteurs évoquent les sources d'énergie « primaires » qui sont *consommables* : leur « consommation mondiale (...) est en augmentation depuis des décennies ». Elles ne sont pas définies, mais des exemples en sont donnés, selon qu'elles sont renouvelables, c'est-à-dire « renouvelée[s] en permanence dans la nature », « inépuisable[s] à l'échelle humaine » (« eau », « biomasse », « Soleil », « terre (géothermie) ») ou non renouvelables, dont le « stock s'épuise au fur et à mesure de [leur] utilisation », « épuisable[s] à l'échelle de vie humaine » (« charbon », « pétrole », « gaz naturel », « uranium »). (C20)

Puissance

Le chapitre 29 de ce manuel s'intitule « Puissance électrique ». Le contenu de son cours (p.308-309) n'a pas été analysé ici parce que l'énergie n'y est pas prise en considération.

Le chapitre suivant (C30, « Énergie électrique et effet Joule ») met en lien la « puissance nominale » d'un appareil électrique et son « énergie électrique consommée » à travers des expressions littérales et une explication : « L'énergie électrique E consommée pendant une durée Δt par un appareil de puissance nominale P est donnée par la relation : $E = P \cdot \Delta t$. »

La puissance n'est pas présentée comme une grandeur associée à l'énergie, mais comme une grandeur associée à des appareils électriques et permettant de calculer des valeurs d'énergie électrique.

Pertes d'énergie

Nous avons relevé une référence implicite au principe de dégradation de l'énergie : la mention d'une « énergie dissipée sous forme de pertes énergétiques », notée « énergie perdue » dans le modèle de bilan énergétique associé (C32 ; Figure 47, Figure 48). Les auteurs ne précisent pas le sens qu'ils donnent au mot « pertes », qu'ils utilisent dans le même paragraphe que celui où ils mentionnent la conservation de l'énergie.

L'effet Joule est évoqué au chapitre 30, uniquement en lien avec des résistances⁹⁰ : « Par effet Joule, l'énergie électrique consommée par la résistance est convertie intégralement en énergie thermique. » (C30)

Dans la fiche méthode pour la représentation d'une chaîne énergétique (Figure 60), il est précisé qu'« à chaque étape de transformation, **une partie de l'énergie est perdue.** » Cette phrase n'est pas discutée et clôt la fiche méthode.

Représentations des phénomènes énergétiques par des chaînes énergétiques

Chaîne énergétique associée à un bilan énergétique

Dans le dernier chapitre (C32), nous avons remarqué deux représentations associées à des bilans énergétiques pouvant être considérées comme des chaînes énergétiques (Figure 47, Figure 48).

Ce sont des représentations spatiales associées à des objets en fonctionnement, sur lesquelles figurent trois « formes d'énergie » : l'énergie reçue, représentée par une flèche bleue, l'énergie utile, représentée par une flèche verte, et l'énergie perdue, représentée par une flèche rouge.

*Figure 47: chaîne énergétique
"bilan énergétique d'un mixer"
(Bordas R-V, p.338)*

90 considérés comme des objets et non des grandeurs

Figure 48: chaîne énergétique "bilan énergétique" associée à une perceuse en fonctionnement (Bordas R-V, p.339)

Sur la Figure 48, nous remarquons des indications de modélisation, qui établissent un lien entre le dessin d'une situation (assimilable au monde empirique) et sa représentation (monde théorique). Il apparaît clairement que les formes d'énergie « utile » et « perdue », mécanique et thermique, sont des attributs du système « perceuse », qui chauffe et dont le foret tourne. Par contre, le fait que la perceuse soit branchée sur le secteur suggère que l'énergie électrique soit extérieure à la perceuse. Selon ce raisonnement, cette chaîne représente donc une perceuse qui reçoit de l'énergie et l'emmagasine, sous forme d'énergie mécanique et d'énergie thermique – ce qui est peu cohérent avec le fonctionnement réel d'une perceuse (et avec l'assertion selon laquelle « l'énergie d'un système se conserve »). Il est probable que les auteurs aient voulu représenter uniquement des transferts (et non des formes d'énergie associées à la perceuse) ; nous constatons que les explications associées à la représentation choisie prêtent à confusion⁹¹.

Autres représentations de type chaîne énergétique dans les pages de cours du manuel

Au chapitre 20, nous avons repéré deux représentations (Figure 49, Figure 50) assimilables à des chaînes énergétiques, selon notre définition. Ce sont des dessins sur lesquels figurent des flèches, qui représentent possiblement des transferts d'énergie. Le texte qui accompagne une de ces représentations (Figure 49) met en évidence un raisonnement séquentiel, et suggère que les flèches du dessin sont associées au transport de l'énergie :

« Une centrale électrique produit de l'énergie électrique. Cette énergie est ensuite acheminée vers les consommateurs par le réseau électrique. L'utilisation d'une source primaire d'énergie permet de créer un mouvement. Ce mouvement entraîne la rotation de l'alternateur. L'alternateur est la partie commune à la majorité des centrales. Il convertit l'énergie du mouvement en énergie électrique. » (Bordas R-V, p.218)

91 Soulignons aussi que la détermination de la part « utile » de l'énergie transférée par une perceuse en utilisation est particulièrement difficile à modéliser.

Figure 49: représentations associées au fonctionnement de centrales électriques (Bordas R-V, p.218)

Figure 50: schéma-bilan du chapitre 20 - les énergies renouvelables et non renouvelables (Bordas R-V, p.219)

Aux chapitres 25, 30 et 31, nous avons relevé plusieurs représentations similaires : des dessins sur lesquels figurent des flèches pouvant représenter des transferts ou des conversions d'énergie (Figure 51, Figure 52, Figure 53, Figure 55, Figure 54, Figure 56). Ces représentations ne semblent pas obéir à des règles de modélisation, mais s'apparentent plutôt à des illustrations (par exemple, on remarque que certains rectangles portent le nom de formes d'énergie, d'autres sont appelés « transfert d'énergie » ou « conversions d'énergie » ; certaines flèches sont représentées entre deux rectangles, d'autres entre le dessin d'un objet et un rectangle).

Figure 51: représentation d'un conversion d'énergie chimique en énergie électrique (Bordas R-V, p.268)

Figure 52: représentation d'un transfert d'énergie (Bordas R-V, p.268)

Figure 53: schéma-bilan représentant des conversions et transferts d'énergie (Bordas R-V, p.269)

Figure 55: représentation associée à l'effet Joule (Bordas R-V, p.319)

Figure 54: représentation associée à la loi d'Ohm et à l'effet Joule (Bordas R-V, p.318)

Figure 56: schéma-bilan comportant des chaînes énergétiques (Bordas R-V, p.329)

Dans le chapitre « Énergies cinétique et potentielle », on trouve une illustration pour les transformations d'énergie : une flèche sur un dessin, où figure deux fois un même skieur, en haut et en bas d'une pente (Figure 57). La flèche, spatiale et implicitement temporelle, représente une transformation d'énergie (appelée conversion par les auteurs).

Figure 57: représentation d'une transformation d'énergie (Bordas R-V, p.278)

Enfin, dans le chapitre qui porte sur les transferts d'énergie, nous relevons deux représentations sur lesquelles figurent des flèches qui illustrent différents modes de transfert thermique (Figure 58, Figure 59⁹²).

Figure 58: représentation des différents modes de transfert thermique (Bordas R-V, p.338)

92 Une analyse de la signification de l'ensemble des flèches qui figurent sur cette représentation pourrait être intéressante, mais elle serait également longue et fastidieuse – et nous éloignerait de nos questions de recherche.

Figure 59: représentation des transferts thermiques (Bordas R-V, p.339)

Fiche méthode pour la représentation des chaînes énergétiques

Une des fiches méthode proposées dans ce manuel concerne la représentation des chaînes énergétiques. Nous l'avons reproduite à la Figure 60.

Figure 60: fiche méthode pour la représentation d'une chaîne énergétique (Bordas R-V, p.425)

Cette fiche explique comment représenter la chaîne énergétique associée à une centrale thermique à combustion fossile. La méthode proposée repose sur deux principes :

- d'une part, une explication séquentielle et une modélisation successive des événements qui ont lieu dans la centrale :

- le chauffage de l'eau correspond à une conversion d'énergie thermique en énergie mécanique ;

- le mouvement de la vapeur d'eau correspond à un transfert d'énergie mécanique de la vapeur d'eau vers la turbine ;
 - l'entraînement de l'alternateur par la turbine qui produit de l'électricité correspond à une conversion d'énergie mécanique en énergie électrique.
- d'autre part, une représentation « calquée » sur le dessin de la centrale : les éléments de la chaîne énergétique sont superposables à ceux qu'ils représentent sur le dessin.

Les transferts et les conversions évoqués sont regroupés sous le terme de « transformations » (étape 4) : la représentation proposée ne repose pas sur la distinction entre plusieurs propriétés ou caractéristiques de l'énergie.

La chaîne obtenue est relativement simple. Elle comporte deux types d'éléments : des cercles dans lesquels figurent les noms de certains éléments de la centrale, et des flèches, sur lesquelles sont inscrites des formes d'énergie assimilables à des modes de transfert de l'énergie. Le rôle de la turbine n'est pas compréhensible sur cette représentation (la flèche qui entre dans le cercle « turbine » et celle qui en sort sont identiques). La vapeur d'eau, évoquée à plusieurs reprises (étape 1, étape 2) n'est pas représentée sur la chaîne finale, sans que les auteurs justifient ce choix.

Le tracé de cette chaîne énergétique ne semble pas faire appel à des règles de modélisation, mais apparaît comme une *possibilité* (étape 4) de représentation des « transformations » de l'énergie mises en jeu dans une centrale, voire comme une illustration du fonctionnement d'une centrale, qui ne fait pas appel aux caractéristiques attribuables au concept scientifique scolaire d'énergie. Le fait que les auteurs aient choisi une situation complexe (fonctionnement d'une centrale) dans le cadre d'une fiche méthode conforte notre hypothèse.

Conclusion de section

Le modèle scientifique scolaire de l'énergie proposé dans ce manuel repose sur la définition mathématique de formes d'énergie, présentées comme des grandeurs physiques. Cependant, elles ne sont pas toujours associées à des systèmes. De ce fait, ce modèle ne permet pas une distinction claire entre les transferts d'énergie et les formes d'énergie.

Les conversions et les transformations de l'énergie ne sont pas distinguées les unes des autres.

Dans les pages de cours analysées, de nombreuses illustrations très diverses sont associées aux transferts d'énergie et aux conversions d'énergie (et, de façon marginale, à une transformation de l'énergie). Bien qu'entrant dans notre définition de chaînes énergétiques, ces représentations ne répondent pas à des règles de modélisation.

Une proposition de méthodologie pour la représentation de chaînes énergétiques est faite par les auteurs, sans formalisme précis : les chaînes évoquées représentent les étapes successives de « transformation » de l'énergie. Dans les parties de cours, il n'est pas fait mention de ce type de chaînes énergétiques.

La conservation de l'énergie ne fait pas partie du modèle mis en évidence : elle est évoquée à deux reprises dans les éléments de cours que nous avons analysés, mais sans être présentée comme un principe général – tout comme la dégradation de l'énergie. La production, la consommation et les pertes d'énergie sont mentionnées, sans que leur sens soit discuté.

Le modèle scolaire mis en évidence comporte une part scientifique – essentiellement mathématique – et une large part sociétale, qui peut expliquer que les principes de conservation et de dégradation ne soient pas au cœur de ce modèle.

10.3.Manuel Hachette Éducation (*Barde et al., 2017*)

Nous avons procédé à l'analyse des parties de cours relatives à l'énergie associées aux modules 6 « L'énergie » et 7 « Les circuits électriques », qui comportent respectivement 3 et 4 pages de « Bilan de fin de cycle » (p.247 à 249 ; p.296 à 299).

Peu d'éléments du module 7 sont liés à l'énergie : pour ne pas alourdir le texte, nous n'avons pas sourcé les citations issues du module 6.

Caractéristiques de l'énergie et éléments spécifiques au modèle

Formes d'énergie

Dans le module 6, sept formes d'énergie sont mentionnées et définies ou illustrées par les phrases suivantes :

- « Un objet en mouvement possède de l'**énergie cinétique**. Cette énergie, notée E_c , augmente lorsque la masse ou la vitesse de l'objet augmente. $E_c = \frac{1}{2} m \cdot v^2$ » (*Les unités associées sont précisées.*)
- « L'**énergie nucléaire** de l'uranium est utilisée dans les centrales nucléaires »
- « Les aliments, le pétrole, le charbon, le gaz contiennent de l'**énergie chimique**. »
- « Un objet situé en hauteur possède de l'**énergie potentielle de position**. Cette énergie diminue lorsque l'objet se rapproche du sol. Elle augmente si la masse de l'objet augmente. »
- « L'**énergie lumineuse** provenant du Soleil nous éclaire et nous chauffe. »
- « Le feu fournit de l'**énergie thermique** (chaleur) **et de l'énergie lumineuse**. »

Dans le module 6, les auteurs précisent que l'énergie électrique peut provenir « d'une pile, d'un générateur, d'une prise électrique... »

Les énergies cinétique et potentielle sont présentées comme des grandeurs, tandis que les autres formes d'énergie sont définies avec un vocabulaire sociétal : le feu est considéré comme une source d'énergie, l'énergie thermique est assimilée à la chaleur.

Sources d'énergie

Les auteurs distinguent les sources selon leur caractère non renouvelable (source qui « disparaîtra un jour à cause de l'exploitation humaine, car ses stocks sur Terre sont limités ou se renouvellent trop lentement ») ou renouvelable (source qui « est exploitable sans limite de durée à l'échelle humaine. ») Des exemples de sources non renouvelables (sources fossiles, source nucléaire) et renouvelables (source éolienne, source solaire, source hydraulique, source biomasse, source géothermique) sont donnés.

Dans le module 7, les auteurs évoquent les sources d'énergie électrique, génératrices de tension : « Pour qu'un courant électrique circule, il doit y avoir une tension aux bornes de la source d'énergie électrique. Si la **tension** délivrée par le générateur augmente, alors la **puissance** reçue par les récepteurs augmente aussi. »

Transfert et conversion d'énergie

Dans le module 6, les auteurs évoquent les transferts et les conversions d'énergie :

« L'énergie ne peut être ni créée, ni détruite. Elle peut être **transférée d'un objet à un autre** ou **convertie d'une forme en une autre**. »

Un transfert d'énergie est défini par l'échange, entre deux corps, d'une même forme d'énergie :

« Deux corps peuvent échanger la **même forme d'énergie** : l'un en gagne, l'autre en perd. On parle de **transfert d'énergie**. »

Les transferts sont donc assimilés à des formes d'énergie, qui sont échangées entre des systèmes. La situation donnée en exemple est celle d'une spirale au-dessus d'une bougie : il est dit que « l'énergie cinétique de l'air est convertie en énergie cinétique de la spirale qui la fait tourner » (*notre soulignage*). Le transfert est donc aussi présenté comme une forme de conversion. Dans le module 7, les transferts électriques sont évoqués sous un autre angle, plus proche du sens que nous leur donnons : « un circuit électrique permet le transfert de l'énergie électrique issue d'un générateur vers un récepteur. »

Une conversion d'énergie est associée à un objet qui change la forme de l'énergie :

« L'énergie peut être convertie d'une **forme en une autre**. »

« Exemple : une pile convertit de l'énergie chimique en énergie électrique et en énergie thermique. »

Il n'est pas fait de distinction entre l'énergie associée au système et l'énergie transmise ou reçue par ce système.

Les « convertisseurs » effectuent des conversions d'énergie :

« Une partie de l'énergie reçue par le convertisseur (**Énergie exploitée**) est convertie en énergie exploitable (**Énergie utile**). Le reste de l'énergie reçue est perdu en général sous forme d'énergie thermique (**Énergie dissipée**). »

Nous en déduisons que l'énergie qu'ils contiennent ne varie pas au cours du temps – bien que les auteurs ne le mentionnent pas de façon explicite.

Les transformations d'énergie ne sont pas mentionnées – même sous une autre dénomination.

Conservation de l'énergie

La conservation de l'énergie est évoquée pour introduire les transferts et les conversions d'énergie :

« L'énergie ne peut être ni créée, ni détruite. Elle peut être **transférée d'un objet à un autre** ou **convertie d'une forme en une autre**. »

Elle est ensuite associée aux chaînes énergétiques qui représentent les convertisseurs (Figure 62) : « La conservation de l'énergie se traduit par la relation : $E_{\text{exploitée}} = E_{\text{utile}} + E_{\text{dissipée}}$ », bien que l'énergie dissipée soit présentée comme « de l'énergie reçue [qui] est perdu[e] en général sous forme d'énergie thermique » (*notre soulignage*).

Énergie exploitée, énergie utile, énergie dissipée et dégradation de l'énergie

L'énergie reçue par un convertisseur est appelée « énergie exploitée », et est notée en bleu. Le convertisseur convertit une partie de cette énergie en énergie « exploitable », appelée « énergie utile » et notée en vert. Le « reste de l'énergie est perdu en général sous forme d'énergie thermique », qui est appelée « énergie dissipée » et notée en rouge.

L'énergie dissipée est, en un sens, associée à la dégradation de l'énergie. Cependant, elle est ici présentée sous un angle sociétal et non scientifique, en opposition à l'énergie « utile ». Dans ce modèle, l'énergie convertie par un radiateur serait intégralement considérée comme « utile » – et non « dissipée ».

Au module 7, l'effet Joule est évoqué, mais il n'est pas mis en lien avec la notion de dissipation de l'énergie :

« Lorsqu'un conducteur électrique est parcouru par un courant électrique, il convertit une partie de l'énergie électrique qu'il reçoit en énergie thermique. Cette conversion est d'autant plus importante que l'intensité du courant est importante. On appelle cela **l'effet Joule**. »

Puissance

Les paragraphes des modules 6 et 7 qui évoquent la puissance ne font référence qu'à des appareils électriques. La puissance y est présentée comme une grandeur associée à un convertisseur. Elle « caractérise son aptitude à convertir l'énergie rapidement » (module 6, module 7) :

« **L'énergie E** consommée ou produite par un appareil de puissance P est **liée à sa durée de fonctionnement t** par la relation $E = P \cdot t$ » (module 6, module 7⁹³).

Les unités associées à cette expression sont données (deux systèmes d'unités).

Représentations des phénomènes énergétiques par des chaînes énergétiques

Dans le module 6, une représentation de type chaîne énergétique est proposée pour les convertisseurs (Figure 61, Figure 62), et « illustre le principe de conservation de l'énergie » (Figure 62).

Cette représentation repose sur plusieurs caractéristiques du modèle que nous avons mis en évidence, et les illustre : les formes d'énergie, les conversions d'énergie, l'exploitation, l'utilisation et la dissipation de l'énergie, ainsi que, dans une certaine mesure, sa conservation.

93 La mise en gras n'est pas la même dans les deux modules, mais les phrases sont identiques.

Elle comporte des limites communes avec les caractéristiques qu'elle illustre : en particulier, les transferts d'énergie sont assimilés à des formes d'énergie, et l'ensemble de ces formes d'énergie sont représentées à l'extérieur des systèmes, ce qui ne permet pas d'établir des règles claires de modélisation à associer à ce type de représentations. Cette non-distinction entre formes et transferts d'énergie rend la lecture du bilan associé à ces chaînes difficile : pour être correcte d'un point de vue scientifique, l'égalité de la Figure 62, appliquée à la chaîne de la Figure 61, doit se lire : « énergie chimique libérée par la pile = énergie électrique fournie par la pile + énergie thermique fournie par la pile » *pendant une certaine durée*.

Bien qu'elle ne prenne pas ici le sens qui lui est attribué en sciences, la mise en évidence de l'énergie dissipée par une flèche de couleur rouge permet d'envisager une représentation de la dégradation de l'énergie sur ces chaînes.

Figure 61: représentation d'une conversion d'énergie par une chaîne énergétique (Hachette Éducation, p.248)

Figure 62: représentation d'une chaîne énergétique et du bilan énergétique associé (Hachette Éducation, p.248)

Dans le module 7, on relève une chaîne énergétique pour la représentation d'un transfert d'énergie « par le circuit électrique », qui apparaît essentiellement illustrative (Figure 63). Les auteurs n'ont pas proposé de représentation similaire à celles que nous avons vues précédemment, où le circuit électrique aurait eu un rôle de convertisseur.

Figure 63: représentation d'un "transfert d'énergie par le circuit électrique" (Hachette Éducation, p.296)

Conclusion de section

Le modèle scolaire de l'énergie que nous avons mis en évidence est à la fois un modèle scientifique, dans lequel l'énergie est présentée comme une grandeur physique qui se conserve, se transfère et donne lieu à des conversions, et un modèle sociétal, dans lequel l'énergie peut être exploitée, consommée et produite, utile ou dissipée. Le vocabulaire lié au concept sociétal d'énergie est utilisé et inclus dans le modèle : il n'est pas discuté en regard d'un concept scolaire *scientifique* de l'énergie « extérieur ».

Les chaînes énergétiques proposées sont associées à un seul objet, assimilé à un convertisseur, dont l'énergie ne varie pas. Elles permettent la représentation d'un grand nombre des caractéristiques de ce modèle, à la fois scientifiques et sociétales.

Les formes d'énergie mentionnées peuvent être associées à des systèmes ou à des transferts. De ce fait, les flèches qui figurent sur les chaînes peuvent représenter un transfert d'énergie (reçu ou émis par le convertisseur) ou une forme d'énergie (contenue dans le système), ce qui rend difficile l'établissement de règles de modélisation claires. L'expression littérale de la conservation de l'énergie associée à ces chaînes demande à être explicitée pour pouvoir être comprise de façon claire, parce qu'elle comporte une dimension temporelle et parce qu'elle met en jeu des grandeurs qui peuvent être associées ou non au système représenté.

Lorsque nous avons effectué notre analyse, nous avons constaté qu'un tiers (une page sur trois) du « bilan de fin de cycle » du module 6 s'intitule « le développement durable » et discute des aspects environnemental, social et économique liés à la « production d'énergie », aux « économies d'énergie (lutte contre les pertes et le gaspillage) » et à « l'efficacité énergétique ». Ceci est cohérent avec le modèle scolaire de l'énergie que nous avons mis en évidence, qui est en grande partie sociétal.

10.4.Manuel Hatier (*Alibert et al., 2017*)

Nous avons procédé à l'analyse des parties de cours relatives à l'énergie associées aux chapitres suivants :

- C20 : L'énergie électrique : de la centrale à l'habitation (bilan / l'essentiel p.268-269)
- C25 : Résistance et loi d'Ohm (bilan / l'essentiel p.336-337)
- C26 : Étude de l'énergie au cours d'un mouvement (bilan / l'essentiel p.350-351)

- C27 : Les différents types de centrales électriques (bilan / l'essentiel p.364-365)
- C28 : Puissance et énergie (bilan / l'essentiel p.378-379)
- C29 : L'énergie chimique et ses conversions (bilan / l'essentiel p.394-395)

La plupart de ces chapitres font référence à et sont centrés sur l'électricité – tous, à l'exception de C26 et C29.

Caractéristiques de l'énergie et éléments spécifiques au modèle

Formes d'énergie

Le première forme d'énergie mentionnée est l'énergie électrique (C20), forme d'énergie « obtenue dans les centrales et transférée par un réseau de lignes électriques jusqu'aux lieux où elle est utilisée ». Par la suite (C28), elle sera définie comme une grandeur physique liée à la puissance électrique et à la durée de fonctionnement d'un appareil électrique.

Dans le premier chapitre (C20), les énergies thermique, lumineuse et cinétique sont évoquées :

« Un appareil électrique **convertit** l'énergie électrique en :

- **énergie thermique** lorsqu'il chauffe ;
- **énergie lumineuse** lorsqu'il éclaire ;
- **énergie cinétique** lorsqu'il crée un mouvement. »

Dans le chapitre 26, les auteurs décrivent :

- l'énergie potentielle de position, « notée E_p », possédée par un objet « du fait de **son altitude** », qui « augmente avec l'altitude et la masse de l'objet »,

- l'énergie cinétique, possédée par « un objet en **mouvement** », « notée E_c , liée à sa vitesse selon la relation : $E_c = \frac{1}{2} \times m \times v^2$ »,

- l'énergie mécanique, « égale à **la somme** de son énergie cinétique E_c et de son énergie potentielle de position E_p ».

Ils évoquent aussi l'« **énergie thermique** », qui apparaît « lors du freinage » d'un véhicule, et l'« **énergie de déformation** », qui apparaît « lors d'une collision si le freinage n'a pas été suffisant ».

Dans le chapitre 29 est décrite « L'**énergie chimique** », « contenue dans la matière, [qui] peut être **convertie** lors de **transformations chimiques** en énergie cinétique (par un muscle), énergie thermique (par une chaufferette) et énergie lumineuse (par une méduse). »

Ces différentes formes d'énergie sont mentionnées tout au long des chapitres ; il n'y a pas de section de cours dédiée où elles sont évoquées toutes ensemble.

Les énergies cinétique, potentielle et chimique sont associées à des objets, à l'inverse des énergies thermique, lumineuse et électrique (voire de déformation).

Sources d'énergie

Les sources d'énergie sont évoquées dans le premier chapitre (C20) et assimilées à des « ressources ». Elles peuvent être renouvelables (« ces ressources se renouvellent très rapidement

ou ne s'épuisent pas ») ou non renouvelables (« leurs réserves s'épuisent plus vite qu'elles ne se forment »). Elles sont « exploitées par les humains » (C27).

Les « sources d'énergie utilisées pour obtenir de l'énergie électrique » sont mentionnées : charbon, gaz naturel, pétrole et uranium (sources non renouvelables), Soleil, eau en mouvement et vent (sources renouvelables).

Transfert d'énergie

Les transferts d'énergie ne sont pas mentionnés en tant que tels dans l'ensemble des extraits que nous avons analysés, à l'exception du chapitre 28, où ils sont exclusivement assimilés à la chaleur : « L'énergie peut être **transférée, sans changer de forme**. Un **transfert d'énergie** peut s'effectuer par **conduction**, par **convection** ou par **rayonnement**. » (C28)

Dans le modèle proposé par les auteurs de ce manuel, les transferts d'énergie – et en particulier les travaux – sont totalement assimilés à des formes d'énergie.

Nous remarquons une autre évocation d'un transfert d'énergie : « L'énergie électrique est **transférée** par un réseau de **lignes électriques** jusqu'aux lieux où elle est utilisée. » (C20) Ce transfert est associé à une idée de *transport* de l'énergie, comme le montre l'illustration qui accompagne cette citation (Figure 71).

Conversion et transformation d'énergie

Les conversions et transformations d'énergie ne sont pas définies ni mentionnées en tant que telles. Cependant, nous avons relevé de nombreuses phrases décrivant des « conversions » d'énergie.

Certaines mettent en jeu à la fois des formes d'énergie associées à des systèmes et des formes d'énergie assimilables à des transferts (elles ne sont donc pas équivalentes aux conversions d'énergie telles que nous les entendons) :

- « Un appareil électrique **convertit** l'énergie électrique en :
 - **énergie thermique** lorsqu'il chauffe ;
 - **énergie lumineuse** lorsqu'il éclaire ;
 - **énergie cinétique** lorsqu'il crée un mouvement. » (C20)
- « Lors du passage du courant dans un résistor, on observe une **augmentation de température** (comme dans tout conducteur). Cette **conversion d'énergie** électrique en énergie thermique est appelée : **effet Joule**. » (C25)
- « L'alternateur **convertit l'énergie cinétique en énergie électrique**. Une partie de l'énergie cinétique est également convertie en énergie thermique (inutile). » (C27)
- « L'**énergie chimique** est contenue dans la matière, elle peut être **convertie** lors de **transformations chimiques** en (...) énergie thermique (par une chaufferette) et énergie lumineuse (par une méduse). » (C29)
- Une pile électrochimique convertit l'énergie chimique en « énergies électrique et thermique ». (C29)

D'autres « conversions » sont assimilables à une transformation de l'énergie :

- « Lors de la **chute libre** d'un objet, son énergie **potentielle de position diminue** (car son altitude diminue). Elle est peu à peu **convertie** en énergie cinétique, qui **augmente** (car sa vitesse augmente). » (C26)
- « L'**énergie chimique** est contenue dans la matière, elle peut être **convertie** lors de **transformations chimiques** en énergie cinétique (par un muscle) (...) » (C29)

Nous n'avons pas pu déterminer avec certitude la nature de la « conversion » évoquée dans la phrase : « L'énergie cinétique d'un véhicule est convertie en énergie thermique lors d'un freinage et en énergie de déformation lors d'un choc. » (C26), mais l'illustration qui l'accompagne (Figure 74) peut laisser supposer qu'il s'agit d'une transformation, interne à la voiture.

L'énergie, une grandeur physique

L'énergie est présentée comme une grandeur quantifiable à partir du chapitre dédié à l'étude de l'énergie en mécanique (C26 – Étude de l'énergie au cours d'un mouvement). Des formules sont données pour le calcul de l'énergie cinétique et pour la conservation de l'énergie mécanique. Dans les chapitres suivants, seront évoqués des bilans d'énergie (C28, C29), puis la relation mathématique entre puissance et énergie (C28).

Conservation de l'énergie

La première mention de la conservation de l'énergie est faite au chapitre 26 :

« Au cours du mouvement d'un objet (en l'absence de frottements), **l'énergie mécanique se conserve** : $E_m = E_p + E_c = \text{constante}$ ».

Une expression plus générale du principe de conservation de l'énergie est proposée au chapitre 28 :

« Lorsque l'énergie est convertie par un dispositif, elle **se conserve** tout en changeant de forme. Le bilan s'écrit : $E_{\text{reçue}} = E_{\text{obtenue(s)}}$ ».

Cette phrase est associée à une « représentation de bilan énergétique » (Figure 69), assimilable à une chaîne énergétique.

De la même manière, au chapitre suivant (C29), il est dit que :

« L'énergie **se conserve**. Elle n'apparaît pas et ne disparaît pas : elle ne peut qu'être convertie d'une forme en une ou plusieurs autres. »

Cette phrase est associée à un « diagramme » énergétique (Figure 67), également assimilable à une chaîne énergétique.

Comme dans les manuels précédemment analysés, les bilans énergétiques proposés peuvent mettre en jeu à la fois des formes d'énergie contenues dans des systèmes et des flux d'énergie émis ou reçus (transferts d'énergie). Ils soulèvent donc des difficultés déjà évoquées, en lien avec le sens donné à ces grandeurs (de natures différentes) et avec la temporalité des événements considérés.

Utilisation et dégradation de l'énergie

À plusieurs reprises, il est fait mention de l'*utilisation* de l'énergie (*notre soulignage*) :

- l'énergie électrique est « obtenue dans les centrales et transférée par un réseau de lignes électriques jusqu'aux lieux où elle est utilisée » (C20) ;

- lorsque « l'alternateur **convertit l'énergie cinétique en énergie électrique** », « une partie de l'énergie cinétique est également convertie en énergie thermique (inutile). » (C27) ;

- Le « **rendement** » est défini « pour chaque convertisseur ; il correspond au **pourcentage d'énergie "utile" obtenue**. » (C28).

La dégradation de l'énergie ou les « pertes » d'énergie ne sont pas évoquées ; l'effet Joule est présenté comme une augmentation de température : « Lors du passage du courant dans un résistor, on observe une **augmentation de température** (comme dans tout conducteur). Cette **conversion d'énergie** électrique en énergie thermique est appelée : **effet Joule**. » (C25)

Puissance

La « puissance électrique reçue par un appareil » est définie au chapitre 28 par la formule « $P = U \times I$ », sans lien avec l'énergie.

Par la suite, l'« énergie électrique » est définie en lien avec la puissance « d'un appareil électrique » et sa « durée de fonctionnement », par la formule « $E = P \times t$ ».

La puissance est présentée comme une grandeur *électrique*, qui peut être associée à un appareil électrique ou à un transfert – dans le sens où elle peut être « reçue » par un appareil électrique.

Représentations des phénomènes énergétiques par des chaînes énergétiques

« Diagramme énergétique » et « bilan énergétique »

Les auteurs de ce manuel proposent deux types de chaînes énergétiques : les « diagrammes énergétiques » et les « représentations de bilans énergétiques », dont ils décrivent les règles de représentation dans une fiche méthode intitulée « traduire la conservation de l'énergie » (reproduite à la Figure 64).

Figure 64: fiche méthode pour la représentation d'un diagramme énergétique et d'un bilan énergétique (Hatier, p.395)

Les règles de représentation associées aux diagrammes énergétiques reposent sur la distinction entre :

- réservoirs, définis par des exemples (« Soleil, vent, réactifs chimiques, etc. »), représentés par des rectangles ;
- convertisseurs, définis par des exemples (« alternateurs, lampes, piles, etc. »), représentés par des cercles ;
- formes d'énergie, définies par des exemples (« énergie cinétique, thermique, électrique, lumineuse, etc. »), représentés par des flèches.

Les mots « réservoir » et « convertisseur » n'ont pas été utilisés dans les parties du cours que nous avons analysées. Le fait qu'une pile soit catégorisée comme un convertisseur nous indique que les définitions données aux réservoirs et convertisseurs ne sont pas conformes à celles qui leur sont associées dans les travaux de didactique mentionnés au chapitre 3. Nous n'avons pas pu déterminer clairement à quoi font référence ces catégories pour les auteurs de ce manuel.

D'après l'encart « règles à respecter », les chaînes à construire sont constituées d'un seul réservoir, situé en début de chaîne, et d'un seul convertisseur, représenté à sa droite. Les exemples de réservoirs, de convertisseurs et de formes d'énergie permettent d'« identifier » les éléments constitutifs de la chaîne à tracer.

Cependant, parmi les diagrammes relevés dans les parties de cours, seul celui de Figure 67 reprend cette structure. Ceux des Figure 65 et Figure 66 ne comportent pas de réservoir. Celui de la Figure 68 comporte trois convertisseurs ; il semble être la représentation de trois situations distinctes regroupées sur un même diagramme (mais l'absence de légende ou d'indication ne nous permet pas de l'affirmer).

L'absence de distinction entre formes d'énergie et transferts d'énergie soulève la question de la représentation des formes d'énergie par des flèches : une forme d'énergie contenue dans un système est représentée à l'extérieur de ce système (par exemple, l'énergie chimique dans les Figure 67 et Figure 68).

Un « bilan énergétique » peut être associé à un diagramme énergétique : cette expression littérale traduit le fait que la valeur de la forme d'énergie « entrante » dans un convertisseur est égale à la somme des valeurs des formes d'énergie « sortantes » (Figure 67). Nous en déduisons que la quantité d'énergie « contenue » dans un convertisseur est constante. Par ailleurs, le fait que ces valeurs d'énergie puissent être associées soit à un système (le réservoir), soit à un transfert soulève les mêmes questions que celles évoquées précédemment, liées au sens donné aux différentes grandeurs mises en jeu et à la durée du phénomène considéré (voir Bordas Espace, *Conservation de l'énergie* ; Hachette Éducation, *Représentations des phénomènes énergétiques par des chaînes énergétiques*).

Les hypothèses que nous avons dû poser pour expliciter le fonctionnement de cette chaîne et la mettre en relation avec l'égalité qui lui est associée ne nous permettent pas d'établir de façon claire les règles de modélisation qui régissent les représentations de type « diagramme énergétique » proposées dans ce manuel.

Figure 65: représentation de la conversion d'énergie effectuée par un résistor (Hatier, p.337)

Figure 66: représentation de la conversion d'énergie effectuée par un alternateur (Hatier, p.365)

Figure 67: représentation de la conversion d'énergie effectuée par un muscle et du bilan énergétique associé (Hatier, p.394)

Figure 68: exemple de diagramme énergétique (Hatier, p.395)

Les chaînes énergétiques de « représentation d'un bilan énergétique » reposent sur l'écriture d'un « bilan énergétique », qui traduit la conservation de l'énergie. Dans la fiche méthode, la conservation de l'énergie est associée à un convertisseur, qui « utilise » « la totalité de l'énergie » qu'il « reçoit », égale à l'énergie qu'il libère – c'est-à-dire à l'énergie « obtenue » (« $E_{re\grave{c}ue} = E_{obtenue(s)}$ »). Bien que les auteurs ne le proposent pas, la représentation associée à ce bilan (en bas de la Figure 64) peut être mise en lien avec le diagramme énergétique qui la précède : un bâton est associé à l'« énergie cinétique », *entrante* dans le convertisseur « éolienne », et un second bâton est associé aux énergies « électrique » et « thermique » *sortantes* de ce convertisseur. Puisque ces deux représentations sont ainsi liées, les questions évoquées lors de l'étude des règles qui régissent l'élaboration des diagrammes énergétiques perdurent, notamment en ce qui concerne l'assimilation des formes d'énergie associées aux systèmes et des transferts qui ont lieu entre les systèmes.

Contrairement aux diagrammes énergétiques, cette représentation est basée sur la propriété de conservation⁹⁴ de l'énergie, dont elle permet la mise en évidence par l'utilisation de bâtons, qui quantifient l'énergie (ou les transferts d'énergie). Dans les parties de cours, nous avons relevé une représentation de ce type, reproduite à la Figure 69. Nous remarquons qu'une partie de l'énergie « obtenue » est qualifiée d'« utile », par opposition à l'énergie qui est dite « inutile ». Cette distinction permet d'aborder la notion de rendement, calculable à l'aide des valeurs qui figurent sur ces chaînes. Les énergies « utile » et « inutile » sont associées à une forme d'énergie particulière, l'énergie « inutile » étant, dans cet exemple, identifiée à l'énergie thermique.

Figure 69: représentation du bilan énergétique associé à une cellule photovoltaïque (Hatier, p.378)

Représentations alternatives associées aux conversions et transferts d'énergie

Dans les parties de cours analysées, nous avons relevé d'autres types de représentations assimilables à des chaînes énergétiques, que nous reproduisons ci-après (Figure 71, Figure 72).

Ces représentations apparaissent comme des illustrations qui ne répondent pas à des règles spécifiques, où les flèches qui indiquent des conversions ou des transferts sont superposées à des dessins – en particulier dans le cas de la représentation des modes de transfert thermique, Figure 72. Le transfert d'énergie électrique suit le trajet des câbles électriques (Figure 71) ; les conversions d'énergie représentées en bas de la Figure 71 ressemblent aux diagrammes énergétiques, dont elles ne reprennent cependant pas le formalisme.

94 Bien que nous ne puissions affirmer quel sens cette propriété revêt ici : est-elle associée à une durée ? Est-elle vue sous sa forme locale ?

Figure 71: représentation d'un transfert et de conversions d'énergie (Hatier, p.269)

Figure 72: représentation des transferts d'énergie (Hatier, p.379)

Représentation de la transformation et de la conservation de l'énergie en mécanique

D'autres représentations schématiques pour les phénomènes énergétiques sont proposées dans le manuel, mais ne sont pas assimilables à des chaînes énergétiques selon notre définition (Figure 73, Figure 74, Figure 75). Elles représentent les transformations d'énergie, et sont exclusivement présentes dans le chapitre dédié à l'étude de l'énergie en mécanique (C26), où les autres chaînes ne sont pas évoquées.

Figure 73: représentation de la "conversion" de l'énergie et de sa conservation pendant une chute libre (Hatier, p.350)

Figure 74: représentation des "conversions" d'énergie qui ont lieu pour un véhicule lors du freinage et lors d'un choc (Hatier, p.350)

Figure 75: représentation de la "conversion" et de la conservation de l'énergie lors d'un plongeon (Hatier, p.351)

Nous en déduisons que, selon les auteurs, les chaînes énergétiques de type « diagramme énergétique » et « représentation de bilan d'énergie » ne permettent pas la représentation de la caractéristique de transformation de l'énergie.

Conclusion de section

Le modèle scientifique scolaire de l'énergie mis en évidence est un modèle focalisé sur les phénomènes énergétiques liés à l'électricité, mentionnés dans la quasi totalité des chapitres. L'énergie est présentée comme une grandeur calculable, parfois associée à un système, mais, le plus souvent, assimilée à un transfert et à une quantité d'énergie transférée.

L'absence de distinction entre énergie associée à un système et énergie transférée entre les systèmes entraîne une difficulté dans la définition des conversions d'énergie et dans leur représentation. Les transferts d'énergie ne font pas partie du modèle ; ils sont mentionnés à la marge, en lien avec les différents modes de transfert thermique, et sans rapport avec toute idée de travail.

La conservation de l'énergie n'est pas présentée comme un principe fondamental de l'énergie : seule la conservation de l'énergie mécanique (en l'absence de frottements) est évoquée, ainsi que la conservation de l'énergie associée à un convertisseur, défini (uniquement dans la fiche méthode) comme un système qui émet toute l'énergie qu'il reçoit.

Plusieurs représentations sont proposées pour les phénomènes énergétiques, qui peuvent être complémentaires les unes des autres. En particulier, les transformations de l'énergie en mécanique ont un formalisme de représentation propre.

À l'exception de la puissance, l'ensemble des caractéristiques de ce modèle scientifique scolaire de l'énergie sont représentées soit sur les chaînes de type « diagramme énergétique », soit sur des chaînes de type « représentation d'un bilan énergétique », soit sur les représentations spécifiques aux transformations de l'énergie en mécanique.

Ces chaînes partagent une limite du modèle : elles ne permettent pas la distinction entre formes d'énergie et transferts d'énergie. Elles ne répondent pas un formalisme de modélisation clair, ce que confirme, selon nous, la non-définition des éléments qui les composent (réservoirs, convertisseurs, formes d'énergie).

Nous soulignons également que ce modèle scientifique scolaire de l'énergie présente un ancrage sociétal fort. En effet, dans tous les bilans, nous avons relevé des références au concept sociétal d'énergie et au développement durable :

- « L'épuisement des ressources non renouvelables est prévisible. Cet épuisement ainsi que les conséquences de leur utilisation sur l'environnement conduisent à utiliser d'autres sources d'énergie. » (C20)
- mention de l'exploitation des sources d'énergie par les humains et du « développement durable » (C27)
- tableau comparatif des avantages et des inconvénients des différentes centrales (pollution, quantité d'énergie électrique qui peut être produite, caractère renouvelable ou non de la source d'énergie, intermittence du fonctionnement, risques d'accidents...) (C27)
- « Utiliser des appareils moins puissants, diminuer leur durée de fonctionnement et éviter de les laisser en veille réduit la consommation d'énergie électrique. » (C28)
- « Les piles et les accumulateurs doivent être déposés dans des **bacs de collecte** afin d'être **recyclés**. Certains d'entre eux contiennent des **substances nocives pour la santé et l'environnement**, et les métaux utilisés pour leur fabrication ne constituent pas une ressource inépuisable. » (C29)
- « Il est souvent plus intéressant d'un point de vue économique et environnemental d'utiliser des accumulateurs (piles "rechargeables"). » (C29)

10.5.Manuel Lelivrescolaire.fr (*Blanc et al., 2017*)

Nous avons procédé à l'analyse des parties de cours relatives à l'énergie associées aux chapitres suivants :

- C21 : Introduire la notion d'énergie (bilan / je retiens par l'image p.276-277)
- C22 : Conversion et transfert de l'énergie (bilan / je retiens par l'image p.290-291)
- C23 : La conservation de l'énergie (bilan / je modélise p.304-305)
- C27 : Résistance et loi d'Ohm (bilan / je retiens par l'image p.360-361)
- C28 : Puissance et énergie en électricité (bilan / je retiens par l'image p.374-375)

Caractéristiques de l'énergie et éléments spécifiques au modèle

Une grandeur associée à un système

Les auteurs du Lelivrescolaire.fr proposent deux définitions pour l'énergie, qu'ils présentent comme une grandeur unificatrice :

« Grandeur mesurée en Joule. Sa valeur caractérise l'objet ou la situation étudiée, et permet de comparer des situations différentes (ex : objet en mouvement ou objet en hauteur) ». (Lelivrescolaire.fr, p.272)

« Valeur calculée par les scientifiques pour tout objet ou situation, afin de pouvoir les comparer » (Lelivrescolaire.fr, lexique, p.447 ; p.286)

C'est une grandeur *associée à un système* et à la quantification des échanges entre systèmes, comme le montrent les citations suivantes :

« L'énergie d'un système caractérise sa situation. Pour qu'elle change, un transfert d'énergie doit avoir lieu. » (C22)

« **L'énergie** d'un système est une valeur qu'on lui associe à partir des grandeurs qui le caractérisent. Elle permet de comparer ce système à d'autres et d'étudier comment ils s'influencent. » (C22)

« On associe de l'**énergie** à un pendule en mouvement car il a soit de la vitesse, soit de l'altitude. » ; « l'énergie des nutriments fournis par l'alimentation » (C21)

« L'énergie n'est pas une substance. C'est une grandeur qui permet de comprendre comment les **systèmes** peuvent s'influencer et évoluer. » (C21)

« L'énergie est une valeur que l'on associe aux objets en fonction de leurs paramètres physiques. Elle permet de déterminer les évolutions possibles lors des interactions entre objets. » (C23)

Les auteurs précisent les unités d'énergie ainsi que les unités de puissance, qui sont mises en regard l'une de l'autre (« Un kilowatt-heure est une unité d'énergie : l'énergie d'un convertisseur d'un kilowatt fonctionnant pendant une heure. »)

Formes d'énergie

Dès le premier chapitre (C21), les auteurs évoquent plusieurs formes d'énergie : l'énergie associée à « la vitesse », l'énergie associée à « l'altitude », l'énergie « associée aux nutriments », l'énergie « associée à l'activité du corps ». Ils précisent qu'« il existe de nombreuses formes d'énergie » (C22), mais ne proposent pas de liste complète de ces formes.

Les énergies cinétique et potentielle de position sont définies dans le lexique (renvois du C23) :

« énergie de position : énergie proportionnelle à l'altitude d'un système. » (p.301, renvoi du C23)

« énergie cinétique : forme d'énergie associée à un mobile du fait de son mouvement. » (p.301, renvoi du C23)

et précisées au chapitre 23, tout comme l'énergie mécanique :

« L'énergie qu'un système possède du fait de son mouvement s'appelle **l'énergie cinétique**. Elle est proportionnelle à la masse du système ainsi qu'au carré de sa vitesse. Doubler la vitesse d'un système fait quadrupler son énergie cinétique. L'énergie cinétique E_c (en J) d'un système se déplaçant à la vitesse v (en m/s) et de masse m (en kg) est donnée par la relation (...) $E_c = \frac{1}{2} \times m \times v^2$ ».

« **L'énergie de position** d'un système est liée à son altitude. Un système en chute libre perd de l'altitude et gagne de la vitesse⁹⁵. L'énergie de position du système est ainsi convertie en énergie cinétique. L'altitude et la vitesse d'un système permettent de lui associer une "énergie mécanique", somme de son énergie de position et de son énergie cinétique. Cette énergie est constante dans le cas d'une chute libre. »

Les énergies « thermique » (C23, C27) et « électrique » (C27) sont également mentionnées, sans être associées à un système, en lien avec des conversions (nous verrons dans le paragraphe dédié dans quelle mesure elles sont assimilées à des transferts d'énergie).

Sources d'énergie

Une source d'énergie est définie comme une « matière première, ou phénomène naturel dont l'exploitation fournit de l'énergie. » (p.247, renvoi du C21)

Au premier chapitre (C21), il est dit que l'énergie utilisée par les machines « pour fonctionner » est issue d'une « source d'énergie », renouvelable ou non renouvelable. Le sens donné à ces mots est précisé à deux reprises :

« Les énergies renouvelables correspondent à des sources d'énergie qui se renouvellent aussi vite qu'on les utilise, ou existent en quantité illimitée. Les énergies non renouvelables correspondent au contraire. Au rythme actuel, elles seront épuisées dans moins de deux siècles. »

puis, dans un encadré :

« Les énergies renouvelables sont disponibles pour une durée limitée, tandis que que l'on aura épuisé les sources d'énergie non renouvelables dans environ deux siècles. »

L'image associée au bilan du C21 (« Je retiens par l'image ») représente trois types de sources d'énergie : « renouvelable » (« vent », « cours d'eau », « Soleil »), « non renouvelable » (« uranium », « hydrocarbures »), et « nutritionnelle » (« agriculture + élevage »).

Nous constatons que le mot « énergie » est parfois utilisé pour désigner une source d'énergie.

Système, réservoir, convertisseur⁹⁶

Dans ce manuel, les termes « réservoir », « convertisseur » et « système » sont fréquemment utilisés (nous l'avons vu dans la définition de l'énergie, notamment). « Système » et « réservoir » sont définis dans les activités qui précèdent les pages des cours les mentionnant, qui comportent des renvois vers ces définitions, reproduites ci-après :

« système : corps ou ensemble de corps délimités dans l'espace. » (p.274, renvoi du C21)

« réservoir : système qui reçoit une forme donnée d'énergie et en restitue une autre. » (p.275, renvoi du C21)

95 En physique, la chute libre est associée au mouvement d'un système soumis uniquement à son poids : il est aussi possible que ce système transforme son énergie cinétique en énergie potentielle (chute vers le haut).

96 Nous évoquerons plus loin la fiche méthode associée à la représentation des chaînes énergétiques, et nous verrons que les réservoirs et convertisseurs y sont définis autrement.

Au chapitre 22, il est dit qu'« un **convertisseur** est un dispositif qui convertit l'énergie d'une forme à une autre⁹⁷. » Selon nous, ces définitions ne permettent pas de différencier clairement un réservoir d'un convertisseur : le premier « restitue » de l'énergie, tandis que le second « convertit » de l'énergie. Par ailleurs, rien n'indique s'il est possible qu'un système donné cumule les rôles de convertisseur et de réservoir.

Nous remarquons aussi que le réservoir mentionné dans une phrase de cours du chapitre 21 répond à une autre définition que celle donnée initialement par les auteurs : son énergie « diminue ou augmente », sans que la forme de cette énergie ne soit mentionnée (« Si l'énergie associée à la situation d'un réservoir donné diminue ou augmente, on dit qu'il y a **transfert d'énergie** : un autre réservoir subit alors l'évolution inverse »).

En ce qui concerne les convertisseurs, les « formes d'énergie » qu'ils convertissent s'apparentent à des transferts d'énergie (elles ne sont pas *contenues* dans les systèmes), comme le montrent les citations suivantes :

« L'alternateur est un exemple de convertisseur d'énergie : il reçoit de l'énergie cinétique et restitue de l'énergie électrique. » (C22)

« Le résistor est un convertisseur d'énergie : il convertit l'énergie électrique en énergie thermique. C'est l'**effet Joule**. » (C27)

Transfert d'énergie

Les transferts d'énergie sont mentionnés à de nombreuses reprises dans les premiers chapitres (C21, C22, C23), mais ne le sont pas dans les chapitres relatifs à l'électricité (C27, C28).

Ils sont définis dès le C21, conformément au sens que nous leur donnons⁹⁸ :

« Si l'énergie associée à la situation d'un réservoir donné diminue ou augmente, on dit qu'il y a **transfert d'énergie** : un autre réservoir subit alors l'évolution inverse ».

Cette définition est reprise au chapitre suivant, et les modes de transfert de l'énergie sont précisés :

« L'énergie d'un système caractérise sa situation. Pour qu'elle change, un transfert d'énergie doit avoir lieu. » (C22)

« La baisse de l'énergie d'un système implique l'augmentation de celle d'un autre. Il s'agit d'un **transfert d'énergie** entre ces deux systèmes. Les différents modes de transfert de l'énergie sont entre autres⁹⁹ : le transfert thermique, le transfert mécanique, le transfert électrique, le transfert par rayonnement. » (C22)

Une autre définition, cohérente avec ce qui précède, est proposée dans une activité du manuel :

97 Nous remarquons que, contrairement à la définition du réservoir, celle-ci ne fait pas appel à la notion de système.

98 Dire de l'énergie qu'elle se transfère parce que sa quantité d'énergie diminue ou augmente au sein d'un système implique une connaissance de son caractère conservatif. Cette formulation est donc différente de la nôtre – bien qu'elles soient cohérentes entre elles.

99 Les transferts mentionnés n'étant pas définis, nous ne pouvons pas savoir à quoi l'expression « entre autres » fait allusion.

« un transfert (d'énergie) : passage d'une quantité d'énergie d'un système à un autre. »
(p.286, renvoi du C22).

Cependant, au chapitre 23, nous relevons par deux fois l'expression « transfert d'énergie thermique », qui n'est pas conforme au modèle que nous venons de décrire (*notre soulignage*) :

« Au cours de la plupart des transferts, et de toutes les conversions d'énergie, l'environnement reçoit un transfert d'énergie thermique. » ;
« Dans la vie quotidienne, les « pertes » d'énergie correspondent le plus souvent à un transfert d'énergie thermique non souhaité. »

Nous remarquons aussi que le titre d'un des paragraphes du bilan du C22 utilise le terme « transfert » en l'assimilant à un phénomène (« La brûlure, un transfert d'énergie douloureux »).

Conversion, transformation et modification de l'énergie

Comme vu précédemment, « un **convertisseur** est un dispositif qui convertit l'énergie d'une forme à une autre » (C22). Cette définition ne fait pas appel à la notion de système, mais revoie *a priori* soit à des modifications, soit à des transformations de l'énergie.

Des conversions sont mentionnées dans l'ensemble des chapitres. Malgré les définitions données pour les transferts et les formes d'énergie, nous constatons une assimilation fréquente entre transferts et formes d'énergie :

« L'alternateur est un exemple de convertisseur d'énergie : il reçoit de l'énergie cinétique et restitue de l'énergie électrique. » (C22)

« Au cours de la plupart des transferts, et de toutes les conversions d'énergie, l'environnement reçoit un transfert d'énergie thermique. » (C23)

« Le résistor est un convertisseur d'énergie : il convertit l'énergie électrique en énergie thermique. C'est l'**effet Joule**. » (C27)

« Le passage d'un courant électrique dans un dipôle ohmique provoque la conversion d'une partie de l'énergie électrique sous forme thermique. Ce phénomène s'appelle l'effet Joule. » (C27)

« En fonctionnant, [les appareils électriques] convertissent l'énergie reçue en une ou plusieurs autres formes d'énergie dont une au moins est utile. » (C28)

Dans cette dernière citation, il est possible que les auteurs fassent référence à une *modification* de l'énergie (forme d'énergie contenue dans le système initial différente de la forme d'énergie contenue dans le système final), tout comme dans la citation suivante :

« Pour effectuer des mouvements et accomplir ses processus biologiques, le corps convertit l'énergie des nutriments fournis par l'alimentation. » (C21)

La transformation d'énergie cinétique en énergie potentielle, évoquée dans le chapitre 23, est présentée comme une conversion (*notre soulignage*) :

« Conversion de l'énergie de position en énergie cinétique » : « Un système en chute libre perd de l'altitude et gagne de la vitesse. L'énergie de position du système est ainsi convertie en énergie cinétique. » ; « L'énergie mécanique d'un système en chute libre reste constante : son énergie de position est convertie en énergie cinétique. »

Nous en déduisons que, dans ce modèle, les conversions, transformations et modifications de l'énergie ne sont pas distinguées les unes des autres.

Puissance

La puissance est évoquée dans le deuxième chapitre (C22) comme une grandeur associée à un convertisseur : « L'énergie E restituée par un convertisseur est proportionnelle à la durée t de la conversion. La puissance P du convertisseur est le coefficient de proportionnalité qui les relie. On écrit : $E = P \times t$. »

Plus loin (toujours au C22), la puissance *d'un convertisseur* est associée à l'énergie *fournie* par ce convertisseur, donc à un transfert *sortant* : « L'énergie E que fournit un convertisseur d'énergie est proportionnelle à la durée t de la conversion. Le coefficient de proportionnalité entre ces grandeurs est nommé **puissance** et se note P . On a $E = P \times t$. Plus un convertisseur est puissant, plus la durée nécessaire pour qu'il convertisse une quantité d'énergie donnée est réduite. »

Dans ce chapitre, la puissance semble associée aux appareils électriques uniquement : les objets donnés en exemple sont un alternateur et une bouilloire électrique.

La puissance est également évoquée au chapitre 28 « Puissance et énergie en électricité », en tant que grandeur associée à un appareil électrique :

« La puissance P d'un appareil est égale à l'énergie E qu'il convertit, divisée par la durée t de cette conversion. »

« Un appareil qui convertit une énergie E en une durée t , possède une **puissance**

$$P = \frac{E}{t} . »$$

Conservation de l'énergie

Le chapitre 23 s'intitule « La conservation de l'énergie » ; cette propriété de l'énergie n'est pas évoquée dans les autres chapitres.

Dans le C23, les auteurs évoquent essentiellement la conservation de l'énergie mécanique dans le cas d'une « chute libre », dont ils ne précisent pas le sens (*notre soulignage*) :

« L'altitude et la vitesse d'un système permettent de lui associer une "énergie mécanique", somme de son énergie de position et de son énergie cinétique. Cette énergie est constante dans le cas d'une chute libre. »

« L'énergie mécanique d'un système en chute libre reste constante : son énergie de position est convertie en énergie cinétique. »

La conservation de l'énergie est ensuite généralisée, et présentée comme empirique :

« On observe que seules les évolutions qui ne font pas changer l'énergie totale sont possibles. On appelle cela la conservation de l'énergie. »

« L'expérience nous dit que : **L'énergie totale se conserve. Lorsqu'un système utilise de l'énergie, celle-ci est seulement transférée ou convertie.** »

Le principe scientifique de conservation de l'énergie est mis en regard du concept sociétal d'énergie (*notre soulignage*) :

« Au cours de la plupart des transferts, et de toutes les conversions d'énergie, l'environnement reçoit un transfert d'énergie thermique. Cela signifie que dans tout processus, une partie de l'énergie du réservoir initial est convertie sous une forme inutilisable. C'est pour cette raison que l'on parle de "pertes". En physique cependant, "produire" ou "consommer" de l'énergie n'a pas de sens. L'énergie est soit transférée, soit convertie, soit stockée. »

Dégradation de l'énergie

La dégradation de l'énergie est évoquée dans le premier chapitre (C21) :

« L'énergie du pendule diminue peu à peu car elle est transférée à l'air » ; « Les frottements du pendule avec l'air sont responsables de son arrêt. »

Dans le chapitre 23, consacré à la conservation de l'énergie, les phénomènes de « pertes » sont évoqués, explicités à la fois sous un angle scientifique et en regard du concept sociétal d'énergie (*notre soulignage*) :

« Au cours de la plupart des transferts, et de toutes les conversions d'énergie, l'environnement reçoit un transfert d'énergie thermique. Cela signifie que dans tout processus, une partie de l'énergie du réservoir initial est convertie sous une forme inutilisable. C'est pour cette raison que l'on parle de "pertes". En physique cependant, "produire" ou "consommer" de l'énergie n'a pas de sens. L'énergie est soit transférée, soit convertie, soit stockée. »

Cependant, la dégradation n'est plus mentionnée par la suite ; en particulier, l'effet Joule est évoqué au chapitre 28 sans lien avec l'énergie.

Représentations des phénomènes énergétiques par des chaînes énergétiques

Fiche méthode pour la représentation des chaînes énergétiques

Une des fiches méthode proposées dans ce manuel concerne la réalisation d'une chaîne énergétique ; nous l'avons reproduite à la Figure 76.

Figure 76: fiche méthode pour la réalisation d'une chaîne énergétique (Lelivrescolaire.fr, p.457)

Ces chaînes sont composées :

- de réservoirs d'énergie, « systèmes qui permettent de stocker de l'énergie », représentés par des rectangles ;
- de convertisseurs d'énergie, « systèmes qui transforment l'énergie qu'ils reçoivent en une autre forme d'énergie », représentés par des ellipses ;
- de transferts d'énergie, représentés par des flèches.

Ici, l'énergie est présentée implicitement comme une substance, notamment à travers la définition donnée aux réservoirs : « systèmes qui permettent de stocker de l'énergie »¹⁰⁰.

Les réservoirs et convertisseurs sont définis, mais ne prennent pas le même sens que celui qui leur est donné dans le reste du manuel (voir ci-avant).

La définition des réservoirs, en regard des exemples qui lui sont associés, pose question : selon les auteurs, le réseau électrique « stocke » de l'énergie, ce qui revient à le considérer comme un

¹⁰⁰ Nous rappelons que nous n'émettons pas de jugement à ce sujet. Par ailleurs, les chaînes énergétiques sont connues pour assimiler l'énergie à une substance (voir chap.2).

objet autonome, déconnecté des centrales électriques. De plus, le fait que les réservoirs – à l’instar du vent – « permet[tent] de stocker de l’énergie » leur donne un rôle *passif* qui interpelle.

Par ailleurs, la formulation choisie pour la définition du convertisseur ne permet pas de déterminer avec certitude dans quelle mesure les formes d’énergie sont distinguées des transferts d’énergie : nous ne savons pas si l’expression « l’énergie qu’ils reçoivent » fait référence à une forme d’énergie ou à un transfert d’énergie ; la flèche qui figure dans la « convention » porte le nom d’une forme d’énergie ; les flèches de la chaîne énergétique de l’éolienne portent le nom de transferts d’énergie.

D’après l’exemple, ces chaînes permettent la représentation de plusieurs caractéristiques de l’énergie, sur lesquelles elles s’appuient : le transfert de l’énergie et sa conversion. Il s’agit de chaînes de type *pendant*, semblables à celles que proposent Gaidioz *et al.* (1998), dont elles reprennent le formalisme actuel (voir §4.3). Bien que cela ne figure pas dans les règles de représentation données, nous remarquons que les auteurs mentionnent aussi des formes d’énergie dans les réservoirs. Il s’agit des formes d’énergie dont la quantité d’énergie varie avec le temps, habituellement représentées sur des chaînes de type *avant-après*. Cette mention permet une représentation de la caractéristique de *modification* de l’énergie. Enfin, nous remarquons que cette chaîne permet la représentation – ou l’identification – de « pertes » d’énergie, qui sont considérées comme des pertes « économiques », et ne sont pas mises en relations avec la propriété de dégradation de l’énergie : il s’agit d’un élément sociétal qui compose le modèle scolaire que nous décrivons.

Chaînes énergétiques figurant dans les cours analysés

Dès le premier chapitre (C21), les auteurs du manuel font référence à la possibilité de représenter les phénomènes énergétiques par des chaînes énergétiques (« Pour décrire un dispositif dans lequel plusieurs transferts ou conversions d’énergie ont lieu, on utilise un schéma appelé chaîne énergétique. » ; « On représente l’ensemble des conversions et transferts d’énergie dans une chaîne énergétique. »)

La même référence est donnée au chapitre suivant : « L’ensemble des conversions et des transferts d’énergie d’un système à un autre peut être modélisé par une chaîne énergétique. » (C22) Un exemple de chaîne énergétique est proposé (reproduit à la Figure 77).

Figure 77: exemple de chaîne énergétique (Lelivrescolaire.fr, p.291)

Cette chaîne ne répond pas aux règles de modélisation proposées dans la fiche méthode : les réservoirs et le convertisseur ne sont pas représentés selon la convention proposée (nous ne savons pas à quoi correspondent les couleurs associées à la bouilloire, au réseau électrique et à l’« eau 1L »), et les transferts d’énergie portent des noms de formes d’énergie.

De la même manière, la Figure 78¹⁰¹ comporte une autre représentation de type chaîne énergétique, qui ne répond pas aux règles méthodologiques de la fiche méthode évoquée précédemment et ne présente pas de ressemblance avec celle dont nous venons de discuter (pas de distinction entre réservoirs et convertisseurs, flèches clairement associées à des formes d'énergie, par exemple « énergie de position »).

Figure 78: représentations de type chaîne énergétique associées à la conservation de l'énergie (Lelivrescolaire.fr, p.305)

Le chapitre 23, dans lequel sont évoquées les formes d'énergie liées à la mécanique ainsi que la conservation de l'énergie, propose un autre type de représentation pour les phénomènes énergétiques : l'association de deux camemberts (Figure 79, Figure 78), assimilable à une chaîne énergétique de type *avant-après* (bien qu'il n'y ait pas de flèche entre les deux camemberts de la Figure 79), qui représente les différentes formes d'énergie associées à un système et leur proportion, assimilée à une représentation de la conservation de l'énergie (d'après les auteurs). Les chaînes énergétiques ne sont pas mentionnées dans les phrases de cours de ce chapitre.

101 Le titre de cette illustration : « Que disent les scientifiques ? » nous interpelle, la représentation des phénomènes énergétiques par des chaînes énergétiques étant une construction scolaire.

Figure 79: représentation associée à la conservation de l'énergie (Lelivrescolaire.fr, p.304)

Conclusion de section

Dans le modèle scientifique scolaire de l'énergie choisi par les auteurs de ce manuel, l'énergie est présentée comme une grandeur associée à un système. La notion de système est importante, et le modèle fait appel à différentes natures de systèmes (les réservoirs et les convertisseurs), qui ne sont pas définis de façon claire : nous avons mis en évidence un manque de cohérence entre les définitions posées et leur interprétation dans les phrases de cours ou dans les représentations graphiques associées.

Les caractéristiques de transfert et de conversion de l'énergie sont mentionnées dès le premier chapitre (C21). Les différents modes de transfert sont mentionnés (C22), mais ils sont le plus souvent assimilés à des formes d'énergie – en particulier lors de l'évocation des conversions d'énergie. Les transformations d'énergie ne sont pas distinguées des conversions.

À plusieurs reprises, l'énergie est présentée comme un concept unificateur. Cependant, nous remarquons que l'énergie chimique n'est pas évoquée dans ce manuel, et que les formes d'énergie en mécanique sont traitées séparément des autres formes, uniquement dans le chapitre lié à la conservation de l'énergie, où les chaînes énergétiques ne sont pas mentionnées.

La conservation de l'énergie est abordée par la conservation de l'énergie mécanique dans le cas d'une « chute libre ». Elle est ensuite généralisée, et présentée comme un résultat expérimental plutôt que comme une construction scientifique.

Ce modèle scientifique scolaire de l'énergie est difficile à préciser. En effet, le sens donné à plusieurs des éléments qui le composent n'est pas figé, en particulier en ce qui concerne les conversions, les réservoirs et les transferts d'énergie. Par ailleurs, la coexistence de plusieurs chaînes énergétiques au sein de ce manuel pose question : aucun des trois types de chaînes rencontrées dans les pages de cours ne reprend les règles de modélisation proposées dans la fiche méthode, et ces chaînes ne représentent pas les mêmes caractéristiques de l'énergie.

Dans ce manuel, nous avons aussi relevé plusieurs remarques destinées à mettre en lien le langage courant et le langage scientifique scolaire, qui ne sont pas présentés comme assimilables l'un à l'autre.

10.6.Manuel Magnard (*Begin et al., 2017*)

Nous avons procédé à l'analyse des parties de cours relatives à l'énergie associées aux chapitres suivants :

- C9 : Sources et formes d'énergie (bilan de cycle 4 / l'essentiel p.236 à 238)
- C12 : Conservation de l'énergie (bilan de cycle 4 / l'essentiel p.314 à 316)
- C13 : Énergie et puissance électriques (bilan de cycle 4 / l'essentiel p.236 à 238)

De nombreux renvois vers le lexique figurent dans ces parties de cours : nous reprenons ces définitions dans notre analyse.

Caractéristiques de l'énergie et éléments spécifiques au modèle

Bien que le lexique de ce manuel attribue des définitions à plusieurs formes d'énergie, il ne propose pas de définition pour l'énergie.

La première phrase du bilan qui se trouve dans le premier chapitre analysé peut être interprétée comme un germe de définition de l'énergie :

« L'être humain a besoin d'énergie pour vivre, se déplacer, s'éclairer, etc. Il la puise dans des sources d'énergie : aliments, bois, charbon, pétrole, gaz, uranium, vent, eau... » (C9, p.237).

Elle traduit une conception substantialiste de l'énergie, présentée comme un concept sociétal plutôt que scientifique.

Sources d'énergie

La première caractéristique de l'énergie évoquée dans ce manuel est liée aux sources d'énergie, dans lesquelles l'être humain « puise » l'énergie dont il a besoin (C9).

Ces sources peuvent être renouvelables ou non-renouvelables :

« Les sources d'énergie renouvelables sont des sources inépuisables à notre échelle. Exemples : l'eau, le vent, le Soleil ou la Terre (géothermie). » (C9)

« Les sources d'énergie non-renouvelables sont des sources qui ne peuvent pas se renouveler à l'échelle humaine de temps (plusieurs milliers d'années). Exemples : le pétrole, le charbon, l'uranium, le gaz naturel... » (C9)

Formes d'énergie

Dans le lexique, les formes d'énergie sont définies en référence aux conversions d'énergie :

« Forme d'énergie : l'énergie se manifeste généralement à travers ses conversions d'une forme dans une autre. *L'énergie peut être sous forme d'énergie électrique, énergie chimique, énergie cinétique, énergie thermique...* » (lexique, p.419)

Les différentes formes d'énergie¹⁰² sont présentées dès le premier chapitre (C9), dans un tableau que nous reproduisons à la Figure 80.

¹⁰² Bien que ce tableau s'intitule « autres formes d'énergie », il présente l'ensemble des formes évoquées dans le chapitre où il se trouve.

Figure 80: "autres formes d'énergie" (Magnard, p.237)

Ici, les formes d'énergie ne sont pas définies mais sont illustrées par des exemples. Les cinq formes présentées à gauche du tableau (énergies cinétique, potentielle, chimique, thermique, nucléaire) sont associées à un objet, ce qui est mis en évidence par l'utilisation du verbe « possède », mis en gras par les auteurs. À l'inverse, les formes « énergie de rayonnement » et « énergie électrique » sont présentées comme « transmises » et évoquent des types de transfert ; il n'est cependant pas fait mention de transferts pouvant s'apparenter à de la chaleur ou à du travail (autre qu'électrique).

Les formes cinétique et potentielle de position de l'énergie sont présentées comme « particulières », associées à l'énergie « mécanique ». Elles sont définies comme suit :

« **L'énergie cinétique** est l'énergie que possède un objet en mouvement. Elle dépend de la masse et de la vitesse. L'énergie cinétique est donnée par : $E_c = \frac{1}{2} m v^2$ » ; les noms des grandeurs mises en jeu et les unités associées sont ensuite données.

« **L'énergie potentielle de position** est l'énergie que possède un objet du fait de sa position. Elle dépend de la masse et de l'altitude. L'énergie potentielle de position est donnée par : $E_p = m g h$ » ; les noms des grandeurs mises en jeu et les unités associées sont ensuite données.

Le lexique (p.419) donne des définitions similaires pour ces formes d'énergie. L'énergie lumineuse y est également définie de la façon suivante :

« Énergie lumineuse [en joules, J] : énergie de rayonnement observée lorsque le rayonnement se produit dans le visible. *Une lampe convertit de l'énergie électrique en énergie lumineuse.* » (lexique, p.419)

Transfert d'énergie

Le lexique propose comme définition pour un transfert d'énergie :

« transfert d'énergie d'un objet à un autre, la forme d'énergie restant la même. *Lorsqu'on pédale l'énergie cinétique du cycliste est transférée aux roues du vélo.* » (lexique, p.422)

Les exemple de transferts évoqués dans les chapitres analysés sont conformes à cette définition :

« L'énergie peut être transférée d'un système à un autre. Exemple : il y a **transfert** d'énergie thermique de la lave vers l'eau de mer. » (C9)

« L'énergie se transfère d'un système à un autre. » (C12)

« L'énergie ne change pas de forme au cours d'un transfert. Exemple : la résistance d'une bouilloire possède de l'énergie thermique qu'elle transmet à l'eau. » (C12)

« L'énergie ne peut pas être créée ni disparaître ; elle peut seulement être transférée ou convertie d'une **forme** en une autre dans un convertisseur d'énergie. » (C9)

Dans ce modèle, les transferts d'énergie sont donc considérés comme des formes d'énergie (ce qui est partiellement cohérent avec les formes d'énergie proposées, qui peuvent être associées ou non à des objets, voir Figure 80).

Conversion et transformation d'énergie

Il n'y a pas de distinction entre transformation et conversion d'énergie, comme l'indique la définition donnée à « transformation d'énergie » par les auteurs dans le lexique :

« expression parfois utilisée pour "conversion d'énergie". *Au cours d'une chute, de l'énergie potentielle de position se transforme en énergie cinétique.* » (lexique, p.422)

Nous constatons cependant que l'exemple donné dans cette définition évoque bien une transformation de l'énergie – au sens où nous l'entendons.

La définition proposée pour une conversion d'énergie est la suivante :

« changement de forme d'une quantité donnée d'énergie. *Un moteur convertit l'énergie électrique en énergie cinétique et en énergie thermique.* » (lexique, p.418)

Ici aussi, l'exemple donné évoque une conversion de l'énergie – au sens où nous l'entendons, malgré l'assimilation des transferts d'énergie à des formes d'énergie.

Dans le manuel, les auteurs choisissent le plus souvent d'utiliser le terme de conversion (et le verbe convertir) :

« L'énergie peut être convertie d'une forme dans une autre. La conversion s'effectue dans un objet que l'on nomme alors un convertisseur. Exemple : Un sèche-cheveux est un convertisseur d'énergie qui **convertit** (on dit parfois aussi qui transforme) l'énergie électrique en énergie cinétique et en énergie thermique. » (C9)

« L'énergie ne peut pas être créée ni disparaître ; elle peut seulement être transférée ou convertie d'une **forme** en une autre dans un convertisseur d'énergie. » (C9)

« L'énergie se convertit (ou se transforme) d'une forme à une autre. » ; « L'énergie change de forme au cours d'une conversion (parfois appelée aussi transformation). Exemple : la résistance de la bouilloire convertit de l'énergie électrique en énergie thermique. » (C12)

« Le batteur à œufs comprend un moteur qui sert à transformer de l'énergie électrique en énergie mécanique. Toute l'énergie n'est pas transformée en énergie mécanique ; l'appareil est en effet chaud après utilisation. La conservation de l'énergie est apparente parce que le bâton représentant l'énergie électrique disponible a la même taille que l'ensemble des deux bâtons représentant l'énergie mécanique et l'énergie thermique. » (C12)

« Lorsqu'il fonctionne, tout appareil électrique convertit une partie de l'**énergie électrique** qu'il reçoit en **énergie thermique** qu'il transfère à l'air qui est autour. » (C13)

Dans tous ces exemples, les formes d'énergie mentionnées peuvent être interprétées comme des transferts d'énergie (« énergie mécanique » ou « énergie cinétique » pour travail mécanique, « énergie thermique » pour chaleur, « énergie électrique » pour travail électrique). Les énergies chimique ou nucléaire, difficilement interprétables comme des transferts, ne sont pas mentionnées dans les conversions.

Les transformations d'énergie ne sont pas évoquées dans ce manuel.

Convertisseur

Le convertisseur n'est mentionné que dans le chapitre 9. C'est un « objet » qui « effectue » une conversion d'énergie :

« L'énergie peut être convertie d'une forme dans une autre. La conversion s'effectue dans un objet que l'on nomme alors un convertisseur. Exemple : Un sèche-cheveux est un convertisseur d'énergie qui **convertit** (on dit parfois aussi qui transforme) l'énergie électrique en énergie cinétique et en énergie thermique. » (C9)

« L'énergie ne peut pas être créée ni disparaître ; elle peut seulement être transférée ou convertie d'une **forme** en une autre dans un convertisseur d'énergie. » (C9)

Conservation de l'énergie

La conservation de l'énergie est évoquée dans les trois chapitres que nous avons analysés (*notre soulignage*) :

« L'énergie ne peut pas être créée ni disparaître ; elle peut seulement être transférée ou convertie d'une **forme** en une autre dans un convertisseur d'énergie. » (C9)

« L'énergie ne disparaît pas. Si elle semble disparaître, c'est qu'une **conversion** ou un **transfert** non attendu s'est produit. » (C12)

« Le batteur à œufs comprend un moteur qui sert à transformer de l'énergie électrique en énergie mécanique. Toute l'énergie n'est pas transformée en énergie mécanique ; l'appareil est en effet chaud après utilisation. La conservation de l'énergie est apparente

parce que le bâton représentant l'énergie électrique disponible a la même taille que l'ensemble des deux bâtons représentant l'énergie mécanique et l'énergie thermique. » (C12)

« Le **bilan d'énergie** rend compte de la **conservation de l'énergie**. » (C13)

« L'énergie totale **se conserve** c'est-à-dire qu'elle ne disparaît jamais. » (C13)

Elle est présentée comme un principe et évoquée dans des domaines variés.

« **Perte** » d'énergie

Dans les chapitres 12 et 13, les auteurs discutent du sens donné à l'expression « pertes d'énergie » dans la société, et la mettent en regard du concept scientifique d'énergie et de son principe de conservation. Nous reproduisons ci-après les définitions du lexiques pour « perte d'énergie » et « gaspillage », ainsi que les paragraphes de cours qui leur sont associés :

« Perte d'énergie [en joules, J] : énergie fournie par un appareil sans qu'elle réponde à un besoin. *L'échauffement d'un ordinateur pendant son fonctionnement est une perte.* » (lexique, p.421)

« Gaspillage : mot usuel utilisé pour désigner une perte d'énergie qui pourrait être évitée. *L'énergie lumineuse fournie par un appareil électrique en veille constitue un gaspillage.* » (lexique, p.419)

« Notion de perte.

La bille ne roule pas indéfiniment sur le sol ; elle s'arrête au bout d'un moment. L'énergie de la bille n'a pas disparu. Du fait des frottements, elle s'est convertie en énergie thermique qui a été transférée à l'air ambiant et au sol.

Les conversions et les transferts d'énergie sont souvent étudiés dans le contexte de la réponse à un besoin de l'individu (se déplacer, se chauffer...) Or ces conversions ou transferts ne sont jamais complets. La différence entre l'énergie mobilisée et l'énergie qui satisfait effectivement le besoin est alors interprété comme une **perte**. Une partie de l'énergie convertie ou transférée est « perdue », c'est-à-dire qu'elle n'a pas répondu au besoin de l'individu. Mais il n'y a pas véritablement de « perte » d'énergie. » (C12)

« On parle de « **gaspillage** » lorsque tout n'est pas mis en œuvre pour limiter les pertes d'énergie. » (C12)

« Les pertes d'énergie électrique.

L'effet Joule constitue généralement une perte que les concepteurs d'appareils cherchent à diminuer mais qui ne peut être complètement supprimée. Il est parfois possible de récupérer cette énergie. Exemple : La piscine du centre aquatique de Bailly-Romainvilliers est chauffée par l'énergie thermique dégagée par les ordinateurs d'une grande banque du quartier de Val d'Europe (94). » (C13)

« On utilise souvent le mot de **gaspillage** pour désigner une perte qui pourrait être évitée mais qui résulte de la négligence de l'utilisateur. C'est une partie de l'énergie qui est consommée par l'utilisateur mais ne sert pas à répondre à un de ses besoins. Il est possible de réduire les gaspillages d'énergie en faisant preuve de davantage de

vigilance. Exemple : Deux lampes allumées dans une pièce inoccupée et bien éclairée par la lumière du jour constituent un gaspillage d'énergie. » (C13)

Ces extraits nous montrent que le mot « perte » est inclus dans le modèle scientifique scolaire de l'énergie proposé par les auteurs de ce manuel. Il y prend à la fois un sens scientifique (il est présenté comme une grandeur dans le lexique, qui s'exprime en joules) et un sens sociétal, puisqu'il quantifie les transferts d'énergie inutiles.

Puissance

La puissance est présentée comme une grandeur permettant de déterminer « l'énergie E consommée par un récepteur pendant une durée t » (C12). Ici, le « récepteur » n'est pas identifié à un appareil électrique : dans les exemples choisis, il s'agit d'un randonneur et d'un four à bois.

La puissance est associée à la consommation d'un récepteur – c'est-à-dire à un transfert d'énergie « entrant » dans un système.

Dans le chapitre suivant (C13), il est question de la puissance d'un appareil électrique (un radiateur, un ordinateur, un grille-pain), qui est associée à une « consommation » d'énergie dont on ne précise pas la forme – *a priori*, électrique.

Représentations des phénomènes énergétiques par des chaînes énergétiques

Représentation des conversions et des transferts d'énergie

Dans le premier chapitre (C9), nous avons relevé plusieurs représentations de type chaîne énergétique (Figure 81, Figure 82).

Figure 81: chaîne énergétique associée à un sèche-cheveux (Magnard, p.237)

Figure 82: chaînes énergétiques représentant un transfert d'énergie et une conversion d'énergie (Magnard, p.238)

La chaîne reproduite à la Figure 81 et la chaîne à droite de la Figure 82 représentent un « convertisseur » et les transferts qui lui sont associés, nommés comme des formes d'énergie. Cette représentation est cohérente avec les éléments de cours que nous avons relevés et présentés précédemment. Elle est une illustration de la définition donnée au « convertisseur ». De la même manière, la chaîne représentée à gauche de la Figure 82 illustre ce qu'est un transfert d'énergie. Ces représentations sont présentées comme des illustrations associées à une caractéristique de l'énergie. Elles ne seront pas reprises dans la suite du manuel.

Bilans d'énergie

Dans les chapitres suivants (C12, C13), nous avons relevé un autre type de chaînes énergétiques, que les auteurs appellent « bilan d'énergie » ou « représentation d'un bilan d'énergie » (Figure 86, Figure 84, Figure 85). Une définition lui est associée dans le lexique, que nous reproduisons en Figure 83.

*Figure 83: définition d'un bilan d'énergie
(Magnard, lexique, p.418)*

D'après cette définition, le bilan d'énergie repose sur deux propriétés de l'énergie : sa conversion (les « formes sous lesquelles l'énergie entre et sort d'un appareil » étant assimilables à des transferts) et sa conservation. Or, la conservation de l'énergie met en jeu les formes de l'énergie *contenues* dans les systèmes et non celles qui sont échangées entre systèmes. Nous en déduisons que la conservation mentionnée ici est une conservation locale de l'énergie (ce qui impliquerait que les « énergies » mentionnées soient considérées comme des modes de transfert, voir §3.1), ou que les formes d'énergie évoquées sont en fait des quantités d'énergie échangées pendant une certaine durée.

Par ailleurs, sur la chaîne, nous remarquons que l'« énergie thermique » n'est pas reliée à l'« énergie électrique » initiale : la flèche qui figure sur cette chaîne représente uniquement la conversion d'« énergie électrique » en « énergie cinétique ».

Les bilans d'énergie associés à un batteur à œufs en fonctionnement (C12, Figure 84) et à un four à micro-ondes en fonctionnement (à gauche de la Figure 85) suivent globalement les mêmes règles que celles que nous venons de voir, mais nous remarquons deux flèches, qui traduisent les deux conversions effectuées par l'appareil (pour le batteur à œufs : d'« énergie électrique » en « énergie cinétique » et d'« énergie électrique » en « énergie thermique »).

Figure 84: "bilan d'énergie" associé à un batteur à œufs (Magnard, p.315)

Figure 85: exemples de bilans d'énergie (Magnard, p.316)

Les bilans d'énergie proposés par les auteurs dans les parties de cours peuvent également représenter des transferts d'énergie (à droite de la Figure 85 ; Figure 86) (C12 : « Un bilan d'énergie peut prendre la forme d'un diagramme où l'on représente les conversions et les transferts d'énergie. »)

Figure 86: "bilan d'énergie" associé à "ce qui est attendu" lors de la cuisson d'une pizza (Magnard, p.315)

Dans la Figure 86, les bâtons tracés de part et d'autre de la flèche représentent les formes d'énergie associées aux « objets » entre lesquels un transfert d'énergie a lieu (le bois et la pizza). Ici, le bois « perd » de l'énergie chimique tandis que la pizza gagne de l'énergie chimique, mais nous ne voyons pas dans quelle mesure cela est mis en évidence sur cette chaîne. Nous ne savons pas à quoi correspond la hauteur des bâtons représentés, ni dans quelle mesure ils pourraient être associés à la conservation de l'énergie – au C12, les auteurs précisent que « Le **bilan d'énergie** rend compte de la **conservation de l'énergie**. »

D'après sa légende, la chaîne à droite de la Figure 85 représente le transfert d'énergie qui a lieu dans un four à micro-ondes, sans que les systèmes (ou objets) entre lesquels ce transfert se fait ne soient identifiés.

Une méthodologie pour la représentation des bilans d'énergie est proposée par les auteurs dans un exercice résolu, que nous reproduisons à la Figure 87. Il n'est pas précisé si le bilan attendu est un bilan *de transfert* ou *de conversion* (par ailleurs, nous remarquons que ce bilan est associé à un objet, dont il faut supposer qu'il est en fonctionnement).

La chaîne attendue s'appuie sur la conservation de l'énergie : avant tout, il est demandé de tracer « deux bâtons (...) identiques » parce que « l'énergie se conserve ». Les transferts d'énergie relatifs à l'appareil considéré sont alors évoqués, en lien avec la caractéristique de conversion de l'énergie. Ils sont ensuite représentés sur le schéma. Les énergies reçues sont de deux formes : thermique et lumineuse. La proportion du bâton attribuée à chacune de ces formes apparaît aléatoire. Nous ne savons pas si les « énergies » représentées et quantifiées sont assimilables à des puissances (qui caractérisent les transferts) ou à des quantités d'énergie échangées pendant une certaine durée ; la question du temps n'est pas évoquée dans la méthodologie de résolution proposée.

Figure 87: méthodologie pour la représentation d'un bilan d'énergie (Magnard, p.317)

Conclusion de section

Le modèle scientifique scolaire que nous avons mis en évidence s'appuie sur les formes d'énergie, qui peuvent être associées à un système ou à un transfert d'énergie entre systèmes, et sur les changements de formes de l'énergie, appelés conversions de l'énergie et le plus souvent associés à des changements de mode de transfert de l'énergie lors d'échanges énergétiques entre systèmes. Les transformations de l'énergie ne sont pas mentionnées.

Le concept d'énergie est présenté comme un concept unificateur ; nous remarquons en particulier que lorsque les auteurs évoquent la puissance, ils l'associent à la « consommation » d'objets qui ne sont pas uniquement électriques. La conservation de l'énergie, présentée comme un principe, est mentionnée dans l'ensemble des chapitres, dans des domaines variés.

Ce modèle prend en compte une grandeur à la fois sociétale et scientifique : la perte d'énergie, qui correspond à la part d'énergie « inutile » émise lors d'une conversion.

Les auteurs mettent en évidence les liens entre le vocabulaire scientifique et le vocabulaire de la vie courante de façon précise et à plusieurs reprises.

Plusieurs sortes de chaînes énergétiques sont proposées :

- La représentation de convertisseurs d'énergie et de transfert d'énergie entre systèmes est proposée au chapitre 9, de façon illustrative ;
- Plusieurs représentations de bilans d'énergie figurent au chapitre 13. Lorsqu'elles représentent une conversion d'énergie, ces chaînes s'appuient sur et modélisent la plupart des caractéristiques que ce modèle attribue à l'énergie : « formes », conversion, et conservation de l'énergie, bien que l'absence d'indications temporelles ne permette pas de déterminer son caractère local ou non. La puissance n'est pas représentée sur ces chaînes.

10.7.Manuel Nathan (*Amauger et al., 2017*)

Nous avons procédé à l'analyse des parties de cours relatives à l'énergie associées aux chapitres suivants :

- C19 : Les différentes formes d'énergie (l'essentiel p.238)
- C20 : Bilan énergétique (l'essentiel p.248)
- C21 : Énergie d'un objet en mouvement (l'essentiel p.258)
- C27 : Puissance d'un appareil électrique (l'essentiel p.338)
- C28 : Consommation d'énergie électrique (l'essentiel p.348)

Caractéristiques de l'énergie et éléments spécifiques au modèle

L'énergie, une grandeur physique liée à la puissance

Dans le manuel Nathan, la définition proposée¹⁰³ pour l'énergie est d'ordre mathématique (Figure 88). Elle présente l'énergie comme une grandeur physique, dépendante d'une autre grandeur : la puissance. Nous remarquons que l'énergie dont il est ici question est « produite » et est associée à une « durée de fonctionnement ».

¹⁰³ Deux indices nous permettent de considérer qu'il s'agit bien d'une proposition de définition : d'une part, elle figure dans un encart « vocabulaire », d'autre part, l'entrée « Énergie » du lexique (p.430) renvoie à cette définition.

Figure 88: définition de l'énergie (Nathan, p.247)

Formes d'énergie

Dès le premier chapitre (C19), les auteurs proposent une liste de formes d'énergie :

« énergie associée au mouvement, énergie chimique, énergie nucléaire, énergie thermique, énergie lumineuse, énergie électrique ».

Ils mentionnent que « certaines formes d'énergie, comme l'énergie lumineuse, sont utilisées pour le transfert car elles ne se stockent pas. » Le caractère stockable ou non des autres formes d'énergie n'est pas évoqué.

Seules les formes cinétique et potentielle sont définies, dans le chapitre qui porte sur l'« énergie d'un objet en mouvement » (C21) :

« L'énergie cinétique E_c (en joules J) d'un corps en mouvement dépend de sa masse m (en kg) et de sa vitesse v (en m/s). La relation entre ces trois grandeurs physiques s'écrit : $E_c = \frac{1}{2} \times m \times v^2$. » (Les noms des grandeurs mises en jeu et leurs unités sont précisées.) (C21)

« Un corps en mouvement possède une **énergie cinétique E_c** . Un corps en altitude par rapport au sol possède une **énergie potentielle E_p** . » (C21)

Sources d'énergie

Dans le premier chapitre (C19), les auteurs distinguent les sources d'énergie renouvelables des sources d'énergie non renouvelables :

« Certaines **sources** d'énergie sont **renouvelables** : elles peuvent être exploitées de façon limitée à l'échelle humaine. D'autres sources d'énergie sont **non renouvelables** : leurs stocks, limités, ne peuvent pas se renouveler à l'échelle humaine. »

Exemples de sources d'énergie renouvelables :

« énergie associée au mouvement de l'eau ou du vent »
« énergie thermique de la Terre »
« énergie thermique et lumineuse du Soleil »
« énergie chimique des végétaux et déchets verts ». (C19)

Exemples de sources d'énergie non-renouvelables :

« énergie chimique stockée dans le pétrole, le gaz, le charbon »,
« énergie nucléaire stockée dans l'uranium ». (C19)

Les « sources d'énergie » ne sont pas définies ; on remarque qu'elles portent le nom d'une *forme d'énergie associée à une source*.

Transfert d'énergie

Les transferts d'énergie sont rarement évoqués dans ce manuel, et ne sont jamais définis. On compte trois occurrences, toutes dans le premier chapitre (C19) :

- le « transfert de l'énergie émise par le Soleil vers la Terre » est représenté sur une illustration (Figure 92) ;
- il est dit que « L'énergie peut être **transférée** d'un objet vers un autre » ;
- les auteurs mentionnent que « certaines formes d'énergie, comme l'énergie lumineuse, sont utilisées pour le transfert car elles ne se stockent pas. »

Dans le chapitre 20, les chaînes énergétiques sont évoquées ; il est dit qu'elles « indique[nt] les formes et les transferts d'énergie utilisés » (Figure 90).

Conversion et transformation d'énergie

Les conversions d'énergie ne sont pas définies, mais sont évoquées à plusieurs reprises. Au C19, le sens qui leur est donné est conforme à notre définition de la conversion – bien que les transferts soient assimilés à des formes d'énergie :

« une forme d'énergie peut être **convertie** en une autre forme d'énergie. »

« conversion de l'énergie thermique et lumineuse du Soleil en énergie électrique par un panneau photovoltaïque »

« conversion de l'énergie électrique en énergie associée au mouvement par le ventilateur » (C19, Figure 92)

Une conversion d'énergie est également mentionnée au C27 :

« La **conversion** de l'énergie électrique en énergie thermique est utilisée dans tous les appareils de chauffage : radiateurs, fours, etc. »

Au C21, les auteurs mentionnent également des « conversions » d'énergie, lorsqu'ils évoquent la transformation des énergies cinétique et potentielle lors du mouvement d'un corps :

« Au cours d'une chute, l'énergie cinétique augmente et l'énergie potentielle diminue : il y a **conversion** de l'énergie potentielle en énergie cinétique. » (en lien avec la Figure 89)

Figure 89: graphique représentant l'évolution des énergies cinétique, potentielle et mécanique¹⁰⁵ d'un ballon au cours d'un lancer (Nathan, p.258)

Convertisseurs et réservoirs d'énergie, énergie utile et énergie perdue

Les convertisseurs et réservoirs d'énergie sont mentionnés dans le chapitre 20, lors de l'évocation des chaînes énergétiques, mais ils ne sont pas définis (Figure 90)¹⁰⁴, tout comme l'« énergie utile » et l'« énergie perdue », également mentionnées en lien avec les chaînes énergétiques.

Conservation de l'énergie

La première évocation de la conservation de l'énergie est en lien avec les chaînes énergétiques (« L'énergie est une grandeur qui se conserve, on peut écrire $E_{reçue} = E_{utile} + E_{perdue}$. », C20 – Figure 90). Il s'agit soit d'une vision locale du principe de conservation de l'énergie, soit d'une vision globale, qui implique de préciser le sens donné aux énergies mentionnées et de prendre en compte la durée du phénomène considéré ; nous y reviendrons lorsque nous analyserons ces chaînes.

Elle est également mentionnée dans le C27, en lien avec une chaîne énergétique (Figure 91) :

« Lors du fonctionnement d'un appareil électrique il y a **conservation de l'énergie** : l'énergie apportée à l'appareil est égale à la somme des énergies fournies. » (C27)

La prise en compte de la durée du phénomène n'est pas mentionnée.

Dans le chapitre 21, la conservation de l'énergie mécanique¹⁰⁵ « en l'absence de frottements » est évoquée :

104 Nous avons relevé une définition pour convertisseur, en dehors des pages que nous avons choisi d'analyser : « dispositif permettant le passage d'une forme d'énergie à une autre. » (Nathan, p.246)

105 Les auteurs ne parlent pas d'énergie mécanique, mais de somme des énergies cinétique et potentielle.

« Un corps en mouvement possède une **énergie cinétique E_c** . Un corps en altitude par rapport au sol possède une **énergie potentielle E_p** . **La somme de l'énergie cinétique et de l'énergie potentielle** d'un corps en mouvement se **conserve**, en l'absence de frottements. Au cours d'une chute, l'énergie cinétique augmente et l'énergie potentielle diminue : il y a **conversion** de l'énergie potentielle en énergie cinétique. » (en lien avec la Figure 89)

Puissance

La puissance est présentée comme une grandeur associée à un transfert : au C20, on relève les expressions « puissance électrique consommée par un ordinateur », « puissance électrique consommée par une bouilloire », « puissance chimique nécessaire à un humain pour vivre¹⁰⁶ », « puissance émise par le Soleil et reçue par la Terre ».

Sa définition est mathématique, en lien avec la définition donnée par les auteurs à l'énergie (Figure 88).

Dans le C28 « consommation d'énergie électrique », on remarque que la puissance est associée à des appareils électriques, mais elle est également liée à la « consommation d'énergie » – il s'agit donc de puissance associée à un transfert « entrant ». (« L'énergie consommée par un appareil électrique dépend de sa durée d'utilisation et de la puissance de l'appareil. », C28)

Pertes, consommation et économies d'énergie

Sur les chaînes énergétiques apparaît une « énergie perdue » ou des « pertes », qui ne sont pas expliquées et sont assimilées à de l'énergie thermique. En dehors de cela, nous n'avons pas trouvé de référence au principe de dégradation de l'énergie ; les « pertes » ne sont évoquées ni en mécanique (où la conservation de l'énergie est vue « sans frottements »), ni en électrocinétique (l'effet Joule est mentionné dans un chapitre sans lien avec l'énergie, bien qu'on puisse y lire la phrase « Lorsqu'une résistance est traversée par un courant électrique, elle produit de la chaleur », C26).

Le C28 concerne l'étude de la « consommation d'énergie électrique »⁸⁷. Les auteurs y donnent des conseils pour « économiser l'énergie », sans mettre en regard cette expression avec le concept scientifique d'énergie – et avec le principe de conservation de l'énergie. Ces conseils suivent un paragraphe qui porte sur la « consommation » de l'énergie électrique, dont le sens n'est pas précisé. Le registre de vocabulaire utilisé ici est plus sociétal que scientifique.

106 À notre avis, la pertinence de cette grandeur est discutable – mais sans lien direct avec notre sujet de recherche.

Représentations des phénomènes énergétiques par des chaînes énergétiques

Les chaînes énergétiques

Les auteurs proposent une représentation des phénomènes énergétiques par des chaînes énergétiques, dont le « principe » est exposé au chapitre 20 et reproduit ci-après (Figure 90).

Figure 90: description d'une chaîne énergétique (Nathan, C20, p.248)

Ces chaînes font appel aux notions de réservoir et de convertisseur, qui ne sont pas définies. D'après les représentations proposées dans ce document, un réservoir d'énergie émet de l'énergie à destination d'un convertisseur. La flèche indique une « énergie reçue », et est donc probablement associée au convertisseur plus qu'au réservoir. Elle peut être comprise comme représentant la quantité d'énergie reçue par le convertisseur *pendant une certaine durée*, bien qu'aucune référence au temps ne soit faite par les auteurs.

Le fait de séparer les « éléments chimiques de la pile », (considérés comme un réservoir) de la « pile » (considérée comme un convertisseur) et de représenter un transfert entre ces deux systèmes nous interpelle. Par ailleurs, une seconde chaîne est proposée dans le manuel ; nous l'avons reproduite à la Figure 91. Sur cette chaîne, nous remarquons que la pile est considérée comme un réservoir, et non comme un ensemble « réservoir + convertisseur ».

Figure 91: chaîne énergétique associée à un dispositif d'éclairage (Nathan, p.338)

Nous n'avons pas su déterminer de règles de modélisation claires pour ces chaînes, en particulier parce que nous n'avons pas pu trouver de définitions cohérentes pour les notions de réservoirs et de convertisseurs. Cependant, ces chaînes partagent les limites que nous avons mises en évidence dans d'autres manuels, liées à leur temporalité et à la non-distinction entre transferts et formes d'énergie.

Une autre représentation pour les transferts d'énergie

L'image reproduite ci-après (Figure 92, C20) est présentée comme une illustration associée aux caractéristiques de transfert et de conversion de l'énergie. Bien qu'elle réponde à notre définition de *chaîne énergétique*, son rôle clairement illustratif nous conduit à ne pas en proposer d'analyse.

Figure 92: représentation du transfert de l'énergie émise par le Soleil vers la Terre (Nathan, p.238)

Conclusion de section

Le modèle scientifique scolaire de l'énergie mis en évidence repose en grande partie sur l'utilisation de formule mathématiques : relation entre énergie et puissance (qui définit l'énergie et qui définit la puissance), formule de l'énergie cinétique, constance de la somme des énergies potentielle et cinétique en l'absence de frottements.

Les formes d'énergie autres que cinétique et potentielle sont évoquées, mais ne sont ni définies, ni décrites. Les transferts d'énergie sont assimilés à des formes d'énergie et les transformations sont assimilées à des conversions d'énergie.

Les auteurs proposent une représentation des phénomènes énergétiques par des chaînes énergétiques, qui comportent différents éléments : des convertisseurs, des réservoirs et des transferts d'énergie (qui portent le nom de formes d'énergie). Les représentations proposées dans le manuel ne permettent pas d'établir de règles claires de modélisation à associer à ces chaînes – où un même objet, ayant *a priori* la même fonction, peut être représenté de deux manières différentes.

Des éléments liés au concept sociétal d'énergie sont évoqués à plusieurs reprises, sans être mis en regard du concept scientifique scolaire d'énergie. On relève en particulier l'utilisation des expressions « consommation d'énergie », « énergie utile », « énergie perdue », « pertes » et « économies d'énergie ».

10.8.Synthèse des modèles proposés dans les manuels

Après avoir mis à jour les modèles scolaires de l'énergie de chaque manuel scolaire, nous proposons de mettre en évidence les régularités et les différences entre ces modèles dans une synthèse commune.

D'une façon générale, nous avons constaté que ces modèles ne sont pas présentés en tant que tels, c'est-à-dire dans un cadre de modélisation clair. Le monde théorique n'est pas clairement séparé du monde empirique, comme en témoignent certaines images que nous avons évoquées (par exemple, se référer aux Figure 50, Figure 57, Figure 71, Figure 72, Figure 92), un grand nombre de nos citations dans lesquelles, en particulier, il est souvent question d'objets qui convertissent l'énergie, ainsi que le fait que, dans les méthodologies de tracé de chaînes, il ne soit jamais fait référence à la « fonction » d'un « système ».

Une définition pour l'énergie ?

Les auteurs de manuels scolaires ne proposent pas de définition commune pour l'énergie. Ils peuvent la présenter soit sous un angle scientifique (Nathan, Lelivrescolaire.fr et Bordas R-V la présentent comme une grandeur physique qui caractérise un système, Lelivrescolaire.fr et Bordas R-V mentionnent les effets du changement de l'énergie d'un système), soit sous un angle sociétal (Bordas Espace et Magnard mentionnent qu'elle est « indispensable à la vie »).

Si l'énergie est considérée comme une grandeur par tous les auteurs, nous remarquons que certains font le choix de ne pas la présenter en tant que telle¹⁰⁷ avant d'aborder les formes d'énergie en mécanique (Bordas Espace, Bordas R-V, Hatier).

107 Elle n'est pas notée « E », on ne lui attribue pas d'unité ni de valeur.

La notion de système

La notion de système et sa définition sont primordiales dans tous les domaines scientifiques. Cette notion est évoquée dans trois manuels : les auteurs du Bordas R-V et du Nathan la mentionnent, mais uniquement dans leur définition de l'énergie, tandis que ceux du Lelivrescolaire.fr proposent une définition pour le mot *système* et parlent à plusieurs reprises de la *quantification de l'énergie d'un système*.

Les sources d'énergie

On trouve une définition des sources d'énergie dans trois manuels : Hatier les assimile à des ressources, tandis que Lelivrescolaire.fr et Bordas Espace les définissent comme un objet (ou « matière première ») *ou un phénomène* qui peut de fournir de l'énergie. Bordas Espace et Hachette Éducation considèrent une prise de courant ou le « feu » comme une source d'énergie ; Bordas Espace y ajoute un « radiateur ».

Bordas R-V parle de sources d'énergie « primaires » *consommables*, tandis que les autres manuels présentent plus ou moins implicitement l'ensemble des sources d'énergie comme des ressources naturelles lorsqu'ils distinguent les sources d'énergie renouvelables des sources d'énergie non renouvelables. Les définitions données pour ces deux catégories de sources d'énergie sont globalement cohérentes les unes avec les autres ; les auteurs du Nathan nomment les sources d'énergie par le nom d'une forme d'énergie qu'elles contiennent.

Formes d'énergie

Bordas R-V, Hatier et Lelivrescolaire.fr ne proposent pas de liste de formes d'énergie dans leurs manuels, à l'inverse de Bordas Espace, Hachette Éducation, Magnard et Nathan.

Tous les manuels évoquent les formes d'énergie électrique, cinétique, potentielle (de position) et thermique. La plupart d'entre eux ajoutent l'énergie chimique, non mentionnée chez Lelivrescolaire.fr (qui évoque une énergie « nutritionnelle ») et l'énergie lumineuse, appelée « rayonnement » chez Magnard et non évoquée chez Lelivrescolaire.fr. Bordas Espace, Bordas R-V, Hachette Éducation, Magnard et Nathan parlent aussi d'énergie nucléaire. Hatier évoque également une « énergie de déformation », et plusieurs manuels mentionnent l'énergie mécanique (nous y reviendrons lorsque nous discuterons de la conservation de l'énergie).

L'énergie électrique occupe une place importante dans le modèle proposé par les auteurs du manuel Hatier, où elle est mentionnée à de très nombreuses reprises ; le premier chapitre associé à l'énergie lui est consacré (il s'intitule : « l'énergie électrique : de la centrale à l'habitation »).

Magnard distingue les formes d'énergie « possédées » par un objet de celles qui sont « transmises » ; Nathan fait remarquer que la lumière ne se « stocke » pas.

Transferts d'énergie

Les transferts d'énergie sont très peu évoqués dans les modèles que nous avons décrits et, lorsqu'ils le sont, ils sont le plus souvent associés à des formes d'énergie (quel que soit le manuel considéré) :

- le travail mécanique est appelé « énergie cinétique » ou « énergie mécanique » ;

- le travail électrique est appelé « énergie électrique » ;
- le transfert thermique est appelé soit « énergie thermique », soit « transfert thermique », mais sans que la distinction entre ces deux expressions soit clairement établie ;
- le rayonnement est appelé « énergie lumineuse ».

Selon nous, la non-distinction entre transfert et forme d'énergie est liée à l'absence de prise en considération des systèmes, notion nécessaire pour mettre en évidence de façon claire la distinction entre ces deux caractéristiques de l'énergie.

Bordas Espace et Bordas R-V proposent une définition pour la « chaleur », identifiée au transfert thermique (Bordas R-V) ou au transfert *de l'énergie thermique* (Bordas Espace), qui peut être effectué par conduction, convection et rayonnement.

Pour Hatier, les transferts d'énergie sont exclusivement la conduction, la convection ou le rayonnement ; ils sont évoqués dans un seul chapitre du manuel.

Conversions et transformations de l'énergie

Les définitions et les exemples de conversions donnés sont, dans une certaine mesure, cohérents avec le sens que nous leur donnons : nous avons montré à plusieurs reprises que les auteurs ne distinguent pas les formes d'énergie des transferts d'énergie ; de ce fait, les conversions qu'ils évoquent sont présentées comme des changements de *formes* d'énergie, et non comme des changements de *modes de transfert* énergétiques.

Il n'est pas possible d'assimiler les formes d'énergie chimique et nucléaire à des transferts, de ce fait, les conversions associées sont difficiles à modéliser par les auteurs. Certains font le choix – implicite – de ne pas évoquer de telles situations (Lelivrescolaire.fr, Nathan). Les autres décrivent des conversions mettant en jeu à la fois des formes d'énergie associées à des systèmes et d'autres formes qui ne le sont pas (assimilables à des transferts). Les règles de modélisation associées à ce type de « conversions » ne rentrent pas dans notre cadre épistémologique de recherche, et les chaînes énergétiques associées ne peuvent pas être facilement analysées.

Puisque les auteurs présentent les conversions comme des changements de forme d'énergie (sans avoir recours aux notions de système et de transfert), ils incluent les transformations de l'énergie dans les conversions – dans son lexique, Magnard précise que les expressions « transformation d'énergie » et « conversion d'énergie » sont synonymes. Cependant, dans l'ensemble des manuels analysés, nous avons remarqué que les représentations de type chaîne énergétique associées aux transformations de l'énergie sont soit significativement différentes des autres, soit inexistantes. Bien que les modèles assimilent conversions et transformations, il apparaît que la représentation de ces deux caractéristiques de l'énergie par une modélisation commune n'est pas envisagée.

Ceci montre une limite, commune aux modèles et à leurs représentations, et est cohérent avec les conclusions de notre analyse théorique : l'utilisation de plusieurs chaînes de natures différentes apparaît nécessaire pour une prise en compte du plus grand nombre possible de caractéristiques associées à l'énergie dans un contexte scolaire.

Conservation de l'énergie

Quatre des sept manuels analysés (Bordas Espace, Bordas R-V, Hatier, Lelivrescolaire.fr) évoquent la conservation de l'énergie pour la première fois en mécanique, « en l'absence de frottements » ou dans le cas d'une « chute libre ». Nathan mentionne la conservation de l'énergie mécanique, mais après avoir évoqué la conservation de l'énergie comme un principe plus large.

Hachette Éducation et Magnard présentent la caractéristique de conservation de l'énergie comme un principe, dans des domaines variés.

Les expressions littérales liées à la conservation de l'énergie proposées dans la plupart des manuels, et souvent mises en lien avec des chaînes énergétiques (Bordas Espace, Bordas R-V, Hachette Éducation) soulèvent plusieurs questions :

- le fait d'égaliser des grandeurs dont le sens physique est différent (des variations d'énergie « contenue » dans des systèmes et des quantités d'énergie transférées – cédées ou reçues par des systèmes) bien que leurs unités soient identiques rend difficile la compréhension et l'interprétation de ces expressions ;
- le fait que les durées associées aux phénomènes à modéliser ne soient jamais évoquées, mais nécessaires à une lecture scientifiquement correcte de ces équations, pose également question.

Les difficultés évoquées sont en grande partie liées à l'absence de définition claire des systèmes mis en jeu, et des valeurs d'énergie qui leur sont associées.

Puissance

La puissance est présentée comme une grandeur uniquement liée aux appareils électriques dans la majorité des manuels (Bordas R-V, Hachette Éducation, Hatier, Lelivrescolaire.fr). En plus de la puissance électrique, la puissance lumineuse est évoquée par les auteurs de Bordas Espace.

Seuls les manuels Magnard et Nathan présentent la puissance comme une grandeur associée à l'énergie et à ses transferts, indépendante du type de phénomène considéré, et l'illustrent par des exemples choisis dans différents domaines scientifiques (physique, chimie, biologie).

Par ailleurs, nous avons remarqué que la puissance est le plus souvent associée à un objet et non à un flux d'énergie – Bordas R-V allant jusqu'à identifier la puissance à la puissance nominale d'un appareil électrique.

Dégradation et utilisation de l'énergie

Les auteurs du Lelivrescolaire.fr donnent une explication claire de ce qu'est la dégradation¹⁰⁸ de l'énergie, qu'ils associent à « tout processus ». Ils mettent en évidence la relation entre cette caractéristique de l'énergie et la notion de « pertes », souvent utilisée dans la vie courante. Ils associent également les « pertes énergétiques » à des « pertes « économiques » ».

L'« énergie perdue » ou les « pertes d'énergie » sont mentionnées dans l'ensemble des manuels, à l'exception d'Hatier. Les auteurs de Bordas Espace précisent que cette expression n'est pas

108 Ils ne donnent pas de nom à cette propriété de l'énergie.

correcte d'un point de vue scientifique et ne doit pas être utilisée. À l'inverse, les auteurs des manuels Hachette Éducation et Magnard considèrent les pertes comme une grandeur physique, incluse dans leur modèle de l'énergie. Chez Hachette Éducation et Bordas R-V, l'énergie perdue est opposée à l'énergie « utile » ; Hachette Éducation l'associe à l'énergie « dissipée » par un appareil.

Si l'effet Joule est mentionné dans tous les manuels, il n'est pas toujours lié au concept d'énergie, et n'est jamais associé à l'idée de dégradation de l'énergie.

Par ailleurs, nous remarquons une caractéristique de l'énergie partagée par plusieurs modèles : l'utilisation de l'énergie. En particulier, cette propriété est représentée sur les chaînes énergétiques proposées dans les manuels Bordas R-V, Hachette Éducation et Hatier, par opposition aux énergies « inutile » (Hatier), « perdue » (Bordas R-V) ou « dissipée » (Hachette Éducation).

Conclusion de section

Nous avons mis en évidence que plusieurs modèles scolaires de l'énergie différents sont proposés par les auteurs de manuels scolaires. Ce sont des modèles scientifiques, mais également sociétaux. Ils partagent certaines caractéristiques, en particulier en ce qui concerne :

- les sources d'énergie, évoquées par l'ensemble des auteurs dans le premier chapitre de chaque manuel, mais auxquels ils ne font que rarement référence par la suite ;
- la plupart des formes d'énergie prises en considération ;
- l'absence de référence aux systèmes mis en jeu dans les situations modélisées, qui entraîne une non-distinction d'une part entre formes d'énergie et transferts d'énergie, d'autre part entre conversions et transformations de l'énergie.

Ces éléments communs donnent des limites communes aux différentes chaînes énergétiques proposées par les auteurs. Les chaînes principalement utilisées ne répondent pas à des règles de modélisation claires et les éléments qui les composent sont rarement définis avec cohérence. Le sens des « énergies » représentées sur les flèches demande à être précisé, et la place du temps dans ces chaînes doit être explicitée pour permettre leur compréhension – et leur analyse. Nous avons constaté que ces chaînes ne sont pas adaptées à la représentation des transformations d'énergie, pour lesquelles certains auteurs proposent des représentations alternatives.

Les limites évoquées rendent souvent les chaînes énergétiques plus illustratives que fonctionnelles.

Nous avons voulu mettre en évidence un modèle scolaire de l'énergie associé à chaque manuel scolaire de Cycle : nous sommes partie de l'hypothèse que les auteurs d'un même manuel scolaire partageaient le même modèle scientifique scolaire de l'énergie *initial*. Cependant, plusieurs indices nous incitent à avancer une autre hypothèse : celle de la coexistence de plusieurs modèles au sein d'un même manuel. Par exemple, les chaînes proposées par Lelivrescolaire.fr sont variées : chaque chapitre en propose un formalisme différent, très distinct des règles de modélisation qui figurent dans la fiche-méthode. Nous pouvons aussi évoquer le type de chaînes proposées dans le premier chapitre du manuel Magnard, qui met en jeu des « convertisseurs », qui ne sera plus évoqué dans la suite du manuel ; la représentation de la pile par les auteurs de Nathan, en opposition selon les chaînes, pose également question ; la définition des transferts par les auteurs d'Hatier, qui distinguent énergie thermique et transfert thermique dans un chapitre, puis les assimilent l'un à

l'autre ; la définition de l'énergie dans le lexique du Bordas R-V, qui fait appel à la notion de système, jamais reprise ailleurs dans le manuel ; la liste des formes d'énergie proposée par Bordas Espace, qui ne comprend pas les énergies potentielle et nucléaire, pourtant évoquées par la suite, etc. Notre connaissance particulière du milieu de l'édition nous amène à suggérer deux pistes pouvant expliquer ces incohérences : d'une part, les différents auteurs d'un même manuel ne partagent pas toujours les mêmes points de vue, et les différents chapitres qui portent sur un même thème ne sont pas nécessairement écrits par les mêmes auteurs¹⁰⁹ ; d'autre part, ces manuels ont été conçus, écrits et édités dans l'urgence (moins d'un an entre la publication officielle des programmes et l'impression des manuels).

Malgré cela, nous considérons que l'analyse que nous proposons, qui tend à déterminer « le » modèle proposé par chaque manuel, reste pertinente : selon nous, un manuel, écrit par un collectif, est un livre autonome, qui a vocation à être considéré et utilisé dans sa globalité.

109 Le manuel qui présente le plus d'incohérences est Lelivrescolaire.fr, écrit par un collectif de 68 auteurs.

11. Tâches mettant en jeu une chaîne énergétique dans les manuels scolaires

Dans ce chapitre, nous allons analyser les tâches qui figurent parmi les exercices proposés dans les manuels scolaires de Cycle 4 et qui mettent en jeu une ou plusieurs chaînes énergétiques. Nous allons catégoriser ces tâches, selon leur fonction, leur nature et leur niveau de complexité, et les mettre en regard des modèles mis en évidence au chapitre précédent.

11.1. Exercices analysés

Nous distinguons trois catégories de tâches mettant en jeu des chaînes énergétiques :

- les tâches qui demandent de **construire** ou de compléter une chaîne énergétique ;
- les tâches qui demandent d'**utiliser**, de lire ou de comprendre une chaîne énergétique déjà existante ;
- les tâches qui demandent de **corriger** ou de modifier une chaîne énergétique.

Ces catégories de tâches sont reliées aux principales fonctions des modèles que nous avons évoquées au premier chapitre : représenter, expliquer, prédire.

Nous avons relevé l'ensemble des exercices mettant en jeu une ou plusieurs chaînes énergétiques. Pour chaque manuel, le Tableau 7 indique le nombre d'exercices impliquant des chaînes et la catégorie des tâches qui composent ces exercices. Un exercice peut comporter des tâches de différentes catégories (les sommes des valeurs des trois colonnes de droite ne sont pas nécessairement égales aux valeurs de la colonne de gauche).

	nombre d'exercices mettant en jeu des chaînes	nombre d'exercices « construire »	nombre d'exercices « utiliser »	nombre d'exercices « corriger »
Bordas Espace	20	14	8	0
Bordas RV	6	4	1	1
Hachette Éducation	24	22	2	2
Hatier	11	11	3	0
Lelivrescolaire.fr	16	14	4	0
Magnard	13	9	3	2
Nathan	10	10	0	0

Tableau 7: catégories des exercices mettant en jeu des chaînes énergétiques

Nous remarquons que la très grande majorité des exercices qui mettent en jeu des chaînes énergétiques se focalisent sur la construction de ces chaînes, et qu'il n'est presque jamais question d'en corriger.

Dans ce chapitre, nous allons nous intéresser particulièrement à la question de l'utilisation des chaînes énergétiques (chap.6, QR2).

Voici la liste des exercices qui mettent en jeu l'utilisation de chaînes énergétiques :

- Bordas Espace : 13p.250, 23p.251, 1p.284, 4p.284, 1p.296, 2p.296, 3p.296, 6p.296
- Bordas R-V : 22p.343
- Hachette Éducation : 41p.254, 45p.254

- Hatier : 8p.368, 16p.370, 14p.384
- Lelivrescolaire.fr : 13p.280, 18p.281, 10p.308, 19p.310
- Magnard : 8p.318, 20p.322, 24p.323

(Le manuel Nathan ne proposant pas de tâche mettant en jeu l'utilisation de chaînes énergétiques, aucune section de notre analyse ne lui sera associée.)

11.2. Analyse des tâches mettant en jeu l'utilisation d'une chaîne énergétique

Nous avons décomposé les exercices en tâches afin d'analyser celles qui associées à l'utilisation d'une chaîne énergétique. Nous avons relevé 51 tâches pour l'ensemble des manuels, pour lesquelles nous avons déterminé :

- la nature de la tâche, c'est-à-dire sa place dans la modélisation (§5.2, Figure 32) :
 - une tâche de nature **a** se résout en passant du monde des objets et des événements vers le monde des théories et des modèles ;
 - une tâche de nature **b** se résout en passant du monde des théories et des modèles vers le monde des objets et des événements ;
 - une tâche de nature **c** peut se résoudre en restant de le monde des théories et des modèles ;
 - une tâche de nature **d** peut se résoudre en restant de le monde des objets et des événements ;
 - la nature « **mod** » sera attribuée aux tâches non élémentaires qui demandent un travail de modélisation large.
- les caractéristiques de l'énergie mobilisées pour la résolution de la tâche :
 - selon les auteurs (caractéristiques dites « manuel »), en reprenant les mots qu'ils utilisent (par exemple, la caractéristique « transfert » pourra être associée à une forme d'énergie) ;
 - selon nous (caractéristiques dites « objectivées »), en reprenant les caractéristiques de l'énergie dans un contexte scolaire telles que nous les avons définies au §3.1 (Tableau 1).
- le niveau de complexité de la tâche :
 - noté **0** lorsqu'il s'agit d'une application directe des connaissances de cours ;
 - noté **1** lorsque la résolution de la tâche nécessite une étape de réflexion supplémentaire (ou l'application de deux parties de cours distinctes) ;
 - noté **2** lorsque la résolution de la tâche implique un plus grand degré de réflexion.

Analyse des tâches issues du manuel Bordas Espace (*Brun et al., 2017*)

Le modèle scientifique scolaire de l'énergie mis en évidence dans le manuel Bordas Espace met en jeu des chaînes énergétiques qui répondent à un formalisme précis, et un grand nombre d'exercices proposés dans ce manuel mettent en jeu des chaînes énergétiques. Le Tableau 8 ci-après récapitule l'ensemble des tâches impliquant l'utilisation de chaînes énergétiques.

N°	Tâche – Bordas Espace	Nature	Caractéristiques (manuel)	Caractéristiques (objectivées)	Complexité
1	Déterminer si la chaîne représente un transfert, une conversion ou une transition d'énergie	d	transfert, conversion	transfert, conversion	0
2	Déterminer quelle chaîne attribuer à une vitre parmi trois propositions	mod	forme, transfert, conversion	(la vitre est associée à un transfert)	1
3	Déterminer quelle chaîne attribuer à un capteur solaire thermique parmi trois propositions	mod	forme, transfert, conversion	transfert, conversion	1
4	Déterminer quelle chaîne attribuer à un capteur solaire photovoltaïque parmi trois propositions	mod	forme, transfert, conversion	transfert, conversion	1
5	Déterminer si la chaîne représente une conversion d'énergie thermique en énergie mécanique	d	conversion, forme	transformation, forme	0
6	Déterminer si la chaîne représente une conversion d'énergie mécanique en énergie thermique	d	conversion, forme	transformation, forme	0
7	Déterminer si la chaîne représente un transfert d'énergie chimique en énergie mécanique	d	forme, transfert, conversion	transformation, forme	0
8	Déterminer si la chaîne représente une transformation exothermique ou endothermique	d	conversion, forme	transfert, conversion	1
9	Déterminer si la chaîne représente une transformation exothermique ou endothermique	d	conversion, forme	transfert, conversion	1
10	Déterminer si la chaîne représente une conversion d'énergie chimique en énergie lumineuse	d	conversion, forme	transfert, conversion	0
11	Déterminer si la chaîne représente une conversion d'énergie thermique en énergie lumineuse	d	conversion, forme	transfert, conversion	0
12	Déterminer si la chaîne représente des pertes d'énergie thermique	d	conversion, forme, dégradation	transfert, conversion, dégradation	1
13	Associer un objet (bougie ou lampe à pétrole) à une chaîne donnée	mod	conversion, forme	transfert, conversion	1
14	Associer un objet (bougie ou lampe à pétrole) à une chaîne donnée	mod	conversion, forme	(identification formes et transferts)	1
15	Associer un objet (bougie ou lampe à pétrole) à une chaîne donnée	mod	conversion, forme	transfert, conversion	1
16	Déterminer si la chaîne proposée représente la conservation de l'énergie	d	conversion, forme, conservation	transfert, conversion, grandeur, conservation	2
17	Déterminer si la chaîne proposée « s'applique » à une source de lumière	b ou c / mod	conversion, forme	transfert, conversion	1
18	Déterminer si la chaîne proposée explique les conversions d'énergie qui ont lieu dans un feu de bois	b ou c / mod	conversion, forme	transfert, conversion	1
19	Expliquer pourquoi les lampes à filament ont été « abandonnées »	b ou c / mod	conversion, forme (dégradation)	transfert, conversion (dégradation)	1

Tableau 8: tâches mettant en jeu l'utilisation d'une chaîne énergétique dans les exercices du manuel Bordas

Les tâches relevées font appel pour moitié à une activité de modélisation, pour moitié à un travail restreint au monde des théories et des modèles, où il est question de faire du lien entre les éléments du modèle scolaire et leur représentation sur les chaînes énergétiques.

Nous remarquons que la plupart de ces tâches sont peu complexes (une seule tâche de niveau de complexité 2) : elles sont le plus souvent élémentaires, ou peu composées. Elles mettent en jeu essentiellement deux caractéristiques du modèle scientifique scolaire proposé par les auteurs du manuel : les conversions et les formes d'énergie ainsi que, de façon marginale, la dégradation (une

occurrence nécessaire, une autre potentielle) et la conservation (une occurrence) de l'énergie. Selon nous, les caractéristiques de l'énergie à mobiliser pour résoudre les tâches analysées sont plus variées : il s'agit essentiellement des formes, des conversions, mais aussi des transferts et transformations de l'énergie, invisibilisées par la méthodologie de modélisation des auteurs.

Analyse des tâches issues du manuel Bordas Regaud-Vento (*Bélanger et al., 2017*)

Les auteurs du Bordas R-V ne proposent de chaînes énergétiques que dans le dernier chapitre du manuel. Seuls 6 exercices de ce livre mettent en jeu de chaînes, parmi lesquels on trouve deux tâches de catégorie « utiliser » (tâches 20 et 21), qui concernent un même exercice du manuel, reproduit à la Figure 93.

Figure 93: exercice 22 p.343, Bordas R-V

Les tâches qui composent cet exercice sont particulièrement complexes, et la chaîne associée ne semble pas répondre à des règles méthodologiques claires : elle n'est pas légendée, et ne comporte aucune référence permettant de déterminer ses règles de construction et de fonctionnement.

Nous n'avons pas pu déterminer avec certitude le sens du problème posé, la signification de la chaîne énergétique et les réponses attendues par les auteurs de cet exercice. Il apparaît que seule l'énergie cinétique du véhicule est prise en considération : nous en déduisons que le véhicule roule sur une route horizontale ; il roule *a priori* à vitesse constante : en l'absence de frottements, son énergie reste constante (sans « apports » de la part du moteur), ce qui est totalement incohérent avec la chaîne proposée, etc.

Au vu de leur complexité, nous supposons que la résolution attendue de cet exercice ne demande pas de comprendre cette chaîne et la mise en situation associée, mais uniquement de considérer que 25 % de l'énergie « initiale » est transférée (ou transmise) au véhicule et lui permet d'atteindre la vitesse de 90 km/h.

Analyse des tâches issues du manuel Hachette Éducation (*Barde et al., 2017*)

Le modèle scientifique scolaire de l'énergie promu par les auteurs de ce manuel donne une large part aux chaînes énergétiques, qui sont mentionnées dans 24 exercices. Dans la plupart d'entre eux, il est demandé de construire des chaînes énergétiques, et seules deux tâches sont associées à l'utilisation de chaînes (Tableau 9).

N°	Tâche – Hachette Éducation	Nature	Caractéristiques (manuel)	Caractéristiques (objectivées)	Complexité
22	Expliquer à quoi correspond l'énergie dissipée dans une chaîne énergétique	d	dissipation, utilisation	(dégradation)	0
23	Écrire la relation entre les différentes énergies mentionnées sur une chaîne énergétique	d	conversion, forme, conservation	transfert, conversion, conservation locale	0

Tableau 9: tâches mettant en jeu l'utilisation d'une chaîne énergétique dans les exercices du manuel Hachette Éducation

Ces tâches font directement appel à des éléments spécifiques du modèle considéré (niveau de complexité nul) :

- tâche 22 : l'utilisation de l'énergie, et sa dissipation, vue comme opposée à l'utilisation (nous ne pouvons pas affirmer que la résolution de cette tâche mette en jeu le principe de dégradation de l'énergie au sens strict, d'où nos parenthèses dans le tableau) ;
- tâche 23 : la conservation de l'énergie telle qu'elle est présentée sur ces chaînes, mettant en lien les énergies « exploitée », « utile » et « dissipée ».

Analyse des tâches issues du manuel Hatier (*Alibert et al., 2017*)

Dans le manuel Hatier, nous avons repéré trois exercices dans lesquels il est demandé d'utiliser une chaîne énergétique. Dans ces trois exercices, il est également demandé de construire ou de compléter une chaîne déjà existante.

Nous n'avons pas pu classer les tâches associées aux deux premiers exercices, dont l'énoncé est reproduit en Figure 94 et Figure 95. Il s'agit d'« exercices résolus », dans lesquels il faut tracer une chaîne énergétique en suivant la méthodologie proposée pour le tracé d'une première chaîne, présentée dans l'énoncé. Ceci ne rentre pas dans notre catégorisation des tâches ; par ailleurs, nous n'avons pas su déterminer le niveau de complexité à attribuer à ces tâches.

Figure 95: exercice 8 p.368, Hatier

Figure 94: exercice 14 p.384, Hatier

Une troisième tâche appartenant à la catégorie « utiliser » a été relevée (Tableau 10).

N°	Tâche – Hatier	Nature	Caractéristiques (manuel)	Caractéristiques (objectivées)	Complexité
26	Déterminer à quel type de centrale la chaîne énergétique est associée.	b	forme (ou source)	forme (ou source)	0

Tableau 10: tâche mettant en jeu l'utilisation d'une chaîne énergétique dans les exercices du manuel Hatier

C'est une tâche simple, qui demande d'identifier un élément du monde empirique par lecture d'une chaîne énergétique.

Les chaînes énergétiques – diagrammes énergétiques et bilans énergétiques – proposées dans le cours et dans la fiche méthode par les auteurs du manuel Hatier sont nombreuses et documentées.

Or, nous constatons qu'elles ne sont que peu mobilisées dans les exercices de ce manuel. Leur *utilisation* est particulièrement rare, et n'est qu'exceptionnellement associée à un travail de modélisation, très peu complexe.

Analyse des tâches issues du manuel Lelivrescolaire.fr (*Blanc et al., 2017*)

Au chapitre précédent, nous avons mis en évidence une multiplicité de propositions de chaînes dans le manuel Lelivrescolaire.fr, qui répondent à des règles de représentation et de modélisation diverses et ne reposent pas sur les mêmes caractéristiques de l'énergie.

Les tâches qui font appel à l'utilisation d'une chaîne énergétique issues du Lelivrescolaire.fr sont réparties sur quatre exercices :

- le premier présente une chaîne qui reprend la plupart des règles de la fiche méthode, où l'on trouve des noms d'énergie (et non de transferts) inscrits sur les flèches (tâche 27) ;
- le deuxième présente une chaîne qui reprend la plupart des règles de la fiche méthode, où rien n'est inscrit sur les flèches (tâches 28 à 31) ;
- le troisième présente une chaîne selon un formalisme qui n'apparaît pas dans le cours (codes de représentation uniques ; réseau électrique » représenté en réservoir final) (tâches 32 à 36) ;
- le quatrième s'appuie sur une chaîne ayant dû être tracée au préalable (exercice de nature « construire » puis « représenter ») (tâche 37).

L'analyse de ces tâches est présentée dans le Tableau 11.

N°	Tâche – Lelivrescolaire.fr	Nature	Caractéristiques (manuel)	Caractéristiques (objectivées)	Complexité
27	Associer des légendes aux éléments constitutifs d'une chaîne énergétique	d	forme ou transfert, réservoir, convertisseur	transfert, réservoir, convertisseur	0
28	Déterminer le réservoir qui transmet l'énergie à l'éolienne	d (ou b)	réservoir (et transfert)	réservoir (et transfert)	0
29	Déterminer la forme d'énergie transmise à l'éolienne	d (ou b)	forme (et transfert)	transfert	0
30	Déterminer le réservoir qui reçoit de l'énergie de la part de l'éolienne	d (ou b)	réservoir (et transfert)	réservoir (et transfert)	0
31	Déterminer la nature du transfert d'énergie de l'éolienne vers le réservoir final	d (ou b)	forme, transfert	transfert	0
32	Déterminer l'énergie que l'on « souhaite » obtenir avec une éolienne	mod	forme, dégradation	transfert, dégradation	1
33	Déterminer l'« énergie initiale dans la chaîne »	d	forme	forme ?	0
34	Déterminer le convertisseur présent dans la chaîne	d	convertisseur (et transfert, conversion)	conversion	0
35	Déterminer pour quelle raison on utilise les éoliennes				
36	Déterminer si toute « l'énergie du réservoir initiale » est convertie par l'éolienne				
37	Déterminer la quantité d'énergies mécanique et thermique « transformées » par un muscle	d	forme, conservation	forme, transfert, conservation	2

Tableau 11: tâches mettant en jeu l'utilisation d'une chaîne énergétique dans les exercices du manuel Lelivrescolaire.fr

Nous n'avons pas pu déterminer avec certitude la nature des tâches associées au deuxième exercice. Sur la chaîne, le mot « éolienne » se trouve inscrit dans une forme géométrique, aussi nous ne pouvons affirmer que les tâches dont il est ici question demandent un réel travail de modélisation. En d'autres termes, nous n'avons pas su répondre à la question : l'« éolienne » mentionnée dans les questions fait-elle partie du monde empirique ou du monde théorique ?

Pour résoudre la tâche 33, il est nécessaire de prendre en considération la forme cinétique de l'énergie, représentée sur une flèche, mais attribuée au système initial (le vent) : nous n'avons pas pu déterminer sur quelle(s) caractéristique(s) de l'énergie la résolution de cette tâche repose.

Par ailleurs, nous n'avons pas su déterminer de quelle manière utiliser la chaîne proposée dans le troisième exercice pour résoudre les tâches 35 et 36.

En ce qui concerne la dernière tâche, sa résolution est dépendante de la chaîne tracée auparavant par la personne résolvant l'exercice. C'est une tâche que nous avons jugée complexe, parce qu'elle met en jeu un raisonnement mathématique appliqué à une chaîne énergétique.

Les caractéristiques de l'énergie le plus souvent mises en jeu dans l'utilisation de chaînes énergétiques sont les formes et/ou les transferts de l'énergie – la distinction entre ces deux caractéristiques n'étant pas toujours faite – ainsi que les notions de réservoirs et convertisseurs, éléments spécifiques au modèle scientifique scolaire considéré.

Analyse des tâches issues du manuel Magnard (*Begin et al., 2017*)

Avant de présenter cette analyse, rappelons que les chaînes énergétiques proposées par les auteurs du manuel Magnard s'appuient particulièrement sur la conservation de l'énergie, représentée par l'égalisation de hauteurs des bâtons situés de part et d'autre de la chaîne qui représente, le plus souvent, une conversion d'énergie effectuée par un appareil.

Les tâches ont été relevées parmi trois exercices (tâches 38 à 40 pour le premier, tâches 41 à 44 pour le deuxième, tâches 45 à 48 pour le troisième) ; l'analyse est présentée dans le Tableau 12.

N°	Tâche – Magnard	Nature	Caractéristiques (manuel)	Caractéristiques (objectivées)	Complexité
38	Déterminer si la chaîne proposée est « correcte »	d (mod)	conservation	conservation	0
39	Déterminer si la chaîne proposée est « correcte »	mod	conservation, conversion	conservation, transferts	1
40	Déterminer si la chaîne proposée est « correcte »	d (mod)	conservation	conservation	0
41	Déterminer la forme d'énergie « utilisée pour faire fonctionner le ventilateur »	d (mod)	forme, conversion	transfert, conversion	1
42	Déterminer les formes d'énergie fournies par les panneaux solaires	d (mod)	forme, conversion	transfert, conversion	1
43	Déterminer la forme d'énergie fournie par le ventilateur	d (mod)	forme, conversion	transfert, conversion	1
44	Expliquer pourquoi « les bâtons représentant l'énergie totale mise en jeu » sont « plus petits dans le bilan d'énergie du moteur que dans celui des panneaux solaires »				
45	Expliquer dans quelles conditions on peut considérer que l'énergie électrique consommée par une télévision en fonctionnement correspond à un gaspillage d'énergie	mod			
46	Expliquer si l'énergie thermique cédée par la télévision à l'extérieur est une perte ou un gaspillage d'énergie	mod			
47	Déterminer si l'énergie lumineuse émise par la télévision est un gaspillage d'énergie	mod			
48	Déterminer si l'énergie thermique émise par la télévision est un gaspillage d'énergie	mod			

Tableau 12: tâches mettant en jeu l'utilisation d'une chaîne énergétique dans les exercices du manuel Magnard

Si les tâches 38 à 43 font explicitement appel à une activité de modélisation, nous avons constaté que seule la résolution de la tâche 39 implique réellement d'effectuer une telle activité. En effet, les autres tâches sont résolubles par simple connaissance des règles d'établissement des chaînes, en l'occurrence, par comparaison des hauteurs de bâtons (tâches 38, 40) ou par lecture de formes d'énergie, ce qui ne nécessite pas de passage par le monde empirique (tâches 41, 42, 43). Seule la tâche 39 fait nécessairement appel à une activité de modélisation : il faut se poser la question du fonctionnement réel d'un batteur électrique pour pouvoir y répondre.

Nous n'avons pas su résoudre la tâche 44 ; nous supposons qu'elle fait appel à la notion de puissance, et que sa résolution implique de considérer que les comparaisons des hauteurs de bâton entre diagrammes reviennent à des comparaisons de puissance ; cette hypothèse est impossible à vérifier.

En ce qui concerne les tâches 45 à 48, elles font appel à la notion de « gaspillage », élément du modèle scolaire de l'énergie proposé par les auteurs. Cependant, leur résolution n'implique pas d'utiliser les chaînes proposées, dont la représentation ne s'appuie pas sur la notion de gaspillage.

La résolution des tâches que nous avons analysées repose essentiellement sur les caractéristiques de conservation et de conversion de l'énergie, à laquelle les auteurs associent des formes d'énergie, que nous considérons comme des transferts.

11.3. Conclusion de chapitre

Dans l'ensemble des manuels, nous avons relevé des exercices impliquant la construction, l'utilisation ou la correction de chaînes énergétiques. La plupart d'entre eux se focalisent sur la *construction* de chaînes énergétiques, et peu d'exercices demandent d'*utiliser* des chaînes énergétiques.

À l'instar de ceux du manuel Nathan, nous avons mis en évidence que les auteurs des manuels Bordas R-V et Hatier ne proposent pas de tâches mettant en jeu l'utilisation de chaînes énergétiques à proprement parler (chaîne non nécessaire pour la résolution de l'exercice proposé par Bordas R-V ; exercices résolus pour Hatier, et tâche demandant d'associer un type de centrale électrique à une chaîne sur laquelle est mentionnée l'« énergie nucléaire »), bien que les chaînes énergétiques soient largement discutées dans les pages de cours des manuels Hatier et Nathan.

À l'exception d'une des onze tâches proposées par Lelivrescolaire.fr, les auteurs des manuels Lelivrescolaire.fr et Hachette Éducation ne proposent que des tâches de nature d qui ne font pas appel à une activité de modélisation : il s'agit de faire correspondre des éléments du modèle scientifique scolaire de l'énergie à leur représentation sur la chaîne énergétique.

Les auteurs des deux autres manuels (Bordas Espace et Magnard) proposent des tâches mettant davantage en jeu la modélisation, c'est-à-dire dont la résolution nécessite de faire du lien entre le monde théorique et le monde empirique.

Les auteurs du manuel Bordas Espace proposent un grand nombre de tâches mettant en jeu l'utilisation de chaînes énergétiques. Plus de la moitié d'entre elles sont de catégorie d, similaires à celles que nous venons d'évoquer. La résolution des autres tâches implique une activité de modélisation, qui peut être élémentaire (nature a ou b) ou composée. Cependant, une seule tâche parmi les 19 relevées a été considérée comme complexe.

Les auteurs du manuel Magnard proposent des tâches qui peuvent être résolues en restant dans le monde théorique (nature d) ainsi que des tâches qui mettent en jeu les notions de « pertes » et de « gaspillage », incluses dans le modèle scolaire de l'énergie proposé, et directement liées au comportement humain et au concept sociétal d'énergie. Nous les avons donc considérées comme des tâches dont la résolution implique un travail de modélisation. Cependant, ce travail ne peut pas se faire uniquement par l'utilisation de ces chaînes, qui ne s'appuient pas et ne permettent pas la représentation des caractéristiques de « pertes » et de « gaspillage ».

Nous avons mis en évidence que les exercices mettant en jeu l'utilisation de chaînes énergétiques sont rares, et que cette rareté n'est pas corrélée avec la place que les chaînes énergétiques occupent dans les parties de cours de chacun des manuels scolaires.

La plupart des tâches analysées sont peu complexes, résolubles par lecture directe des mots inscrits sur la chaîne, sans travail de modélisation ; leur résolution n'implique pas une compréhension des caractéristiques de l'énergie qui les sous-tendent. En d'autres termes, d'un point

de vue praxéologique, lors de la résolution de la plupart de ces tâches, rien ne permet de dire que l'utilisation d'une technique « efficace » soit mise en lien avec la technologie qui la justifie, et ce, d'autant plus que ces technologies sont le plus souvent difficiles à mettre en évidence – elles sont reliées à des règles de modélisation particulièrement difficiles à établir (voir chap.10).

Conclusion de la troisième partie

Les modèles scolaires de l'énergie que nous avons mis en évidence présentent plusieurs caractéristiques communes, parmi lesquelles la prise en compte de sources d'énergie et de formes d'énergie, et un ancrage fort sur les conversions de l'énergie et son utilisation. Cependant, nous avons constaté une variabilité dans le sens donné à certaines de ces caractéristiques, souvent très éloigné de celui qu'il prend généralement en sciences ou en didactique.

Dans les manuels, les transferts d'énergie sont présentés comme les transferts *d'une forme d'énergie*, et on leur attribue généralement le nom de la forme d'énergie transférée, qui peut être mécanique (voire cinétique), électrique, thermique ou lumineuse. La question du système auquel est attribuée chaque forme d'énergie n'est pas posée, ce qui rend possible l'assimilation des transferts d'énergie à des formes d'énergie. Par suite, les conversions d'énergie sont présentées comme des changements de forme d'énergie, et englobent les transformations d'énergie (internes à un système).

Ce que nous venons de décrire peut être considéré comme un ensemble de caractéristiques de l'énergie attribuables à un modèle scientifique scolaire de l'énergie institutionnel initial. L'analyse des chaînes énergétiques, représentations de ce modèle, met en évidence son caractère lacunaire : ces chaînes font nécessairement appel à la définition – implicite ou explicite – de systèmes, qui apparaissent parmi les éléments constitutifs des chaînes, et la non distinction entre formes et transferts d'énergie entraîne une difficulté dans le tracé des chaînes et dans l'identification des règles de modélisation qui leur sont associées.

Les chaînes analysées comportent beaucoup d'implicite, notamment en ce qui concerne la signification des « énergies » mentionnées, la nature des transferts et la durée des phénomènes représentés. Dans les manuels, les exercices qui mettent en jeu l'utilisation de chaînes sont peu nombreux. Les tâches demandées sont généralement peu complexes, et les réponses attendues ne demandent pas, le plus souvent, une réelle activité de modélisation. Nous avons constaté que la résolution des tâches est le plus souvent intuitive, et ne peut pas être justifiée rigoureusement par une technologie. Par exemple, pour répondre aux questions « quelle forme d'énergie reçoit la lampe ? » ou « quelle forme d'énergie possède la lampe ? », la technique attendue est de lire ce qui est inscrit sur la flèche « entrante » dans la forme géométrique qui représente la lampe – sans se poser la question de l'assimilation des transferts à des formes d'énergie, ou réfléchir aux systèmes mis en jeu. Du point de vue praxéologique, on observe une cassure entre technique et technologie, c'est-à-dire entre savoir-faire et savoir.

Nous avons remarqué que les modèles proposés par les auteurs des manuels partagent des spécificités, qui ne font pas partie du modèle issu du programme :

- la distinction entre sources d'énergie renouvelables et non renouvelables (dans l'ensemble des manuels) ;
- l'interprétation de la puissance comme une grandeur uniquement électrique (définition généraliste dans deux manuels sur sept) ;
- l'évocation de la conservation de l'énergie mécanique (cinq manuels sur sept, dont quatre avant de mentionner la conservation de l'énergie).

Nous constatons que ces éléments, qui ne sont pas mentionnés dans le programme auquel se réfèrent les manuels, l'étaient dans le programme précédent (M.E.N., 2008).

Les programme et documents d'accompagnement insistent sur la nécessité de clarifier certains mots qui font partie du modèle sociétal de l'énergie (dont ils ne proposent pas de définition). Les manuels scolaires proposent une contextualisation du concept d'énergie, notamment en lien avec des considérations écologiques (économies d'énergie, pollution, etc.) Certains auteurs proposent un modèle scolaire de l'énergie à la fois scientifique et sociétal, soit en donnant une dimension scientifique au vocabulaire sociétal (par exemple : définition de la grandeur « pertes »), soit en faisant l'usage d'un vocabulaire et de considérations de nature sociétale (par exemple : considérer la prise de courant ou le feu comme une source d'énergie).

Quatrième partie : la formation continue à l'enseignement de l'énergie à destination des enseignants de Cycle 4



Dessin de Charb, paru dans les Cahiers pédagogiques n°435, Enseigner, un métier qui s'apprend, septembre 2005

À notre connaissance, pendant l'année scolaire 2021-2022, six stages de formation continue à destination d'enseignants de collège (ou de collège et de lycée) relatifs à l'enseignement de l'énergie ont été dispensés en France métropolitaine ; nous les notons F1, F2, F3, F4, F5 et F6.

Nous avons contacté l'ensemble des formateurs dispensant les formations F1, F2 et F3 :

Pour la formation F1 : 3 formateurs, que nous appelons F1A, F1B, F1C ;

Pour la formation F2 : 4 formateurs, que nous appelons F2A, F2B, F2C, F2D ;

Pour la formation F3 : 3 formateurs, que nous appelons F3A, F3B, F3C.

Parmi l'ensemble de ces formateurs, seul F3C n'a pas souhaité répondre à nos questions.

Plusieurs intervenants ont participé aux formations F4, F5 et F6. Nous avons pu entrer en contact avec les formateurs responsables de chacune de ces formations, que nous appelons F4A, F5A et F6A.

Ces douze formateurs ont participé à des entretiens semi-directifs individuels, au cours desquels ils ont été amenés à parler de leur parcours professionnel, à décrire le stage de formation proposé et à discuter du concept d'énergie. Le protocole d'entretien et les transcriptions des entretiens se trouvent en annexes B et A.

Par l'analyse des transcriptions des entretiens, nous décrivons les modèles scolaires de l'énergie proposés par les formateurs, l'utilisation souhaitée de ces modèles dans un contexte de formation et d'enseignement, et inférons les raisons qui expliquent ces choix (en suivant la méthodologie décrite au chapitre 7). Les analyses des stages de formation F4, F5 et F6, adossés à un même organisme, sont regroupées au sein du chapitre 13. Les chapitres 12, 14 et 16 présentent respectivement les analyses associées aux stages de formation F3, F2 et F1.

Dans chacun de ces chapitres, nous commençons par des considérations générales sur les formateurs et le stage de formation qu'ils animent, puis nous présentons les déterminants potentiels de l'activité des formateurs et le modèle scientifique scolaire de l'énergie qu'ils proposent.

Nous avons assisté à une partie du stage de formation F2 et à la journée de formation F1, qui seront analysées aux chapitres 15 et 17.

Une lecture des chapitres 14 et 15 (resp. 16 et 17) permet d'avoir une vue d'ensemble sur la formation F2 (resp. F1) ; une lecture des chapitres 12, 13, 14 et 16 permet d'avoir une vue d'ensemble sur les pratiques déclarées relatives à la formation continue à l'enseignement de l'énergie en France métropolitaine.

12. L'énergie vue par les formateurs F3A et F3B – analyse de pratiques déclarées

Dans ce chapitre, nous présentons le modèle scientifique de l'énergie évoqué par F3A et F3B au cours de nos entretiens, présenté pendant le stage de formation F3. Nous le mettons en regard des contraintes institutionnelles, sociales et personnelles mises en évidence au cours de ces entretiens¹¹⁰.

12.1. Quels formateurs, quelle formation ?

Le stage de formation F3 s'est déroulé à l'automne 2021 : il avait déjà eu lieu lorsque nous avons réalisé nos entretiens. Il s'adressait à des enseignants du secondaire de physique-chimie, de collège et de lycée. Dix-huit enseignants-stagiaires y ont participé, parmi lesquels une seule enseignante de collège (F3A, 4 ; 238).

Présentation des formateurs

Trois intervenants ont participé à la formation des stagiaires : F3A, F3B et F3C. Ce dernier n'ayant pas répondu à nos sollicitations, nous n'avons pas de données directes le concernant.

F3A a suivi des études de « physique pure » (F3A, 10). Après avoir eu une licence et une maîtrise, elle a passé les concours de l'enseignement, n'a pas obtenu l'agrégation, mais a été reçue au CAPES. Elle a enseigné une année en lycée (année de stage), puis 8 années à l'École Française Internationale de Berne, où elle a dispensé des cours de mathématiques, physique et informatique au collège (F3A, 15-21). À son retour en France, elle a enseigné en REP+ (F3A, 38). En 2016, elle passe et obtient l'agrégation de physique, après avoir suivi une préparation au concours. Elle travaille une année de plus en collège, puis obtient sa mutation pour le lycée (F3A, 43 ; 38-39). Actuellement, elle est tutrice d'une stagiaire en collège, et ce depuis deux ans (F3A, 45-46). F3A n'avait jamais animé de formation jusqu'à présent et ne souhaite pas devenir formatrice académique (F3A, 60-66) ; elle n'a suivi aucune formation de formatrice (F3A, 67-69).

F3B a suivi des études de physique et a obtenu l'agrégation de physique en 2002 (F3A, 56). Il a ensuite fait une thèse en physique, et s'est spécialisé dans la physique de l'atmosphère et du climat (F3B, 57-58). Il est actuellement professeur (F3B, 2), maître de conférence HDR (F3B, 68-69) en physique, enseignant formateur à l'agrégation de physique externe et spéciale (F3B, 2-3). Il a publié trois articles sur l'enseignement de l'énergie au BUP et à l'European Journal of Physics (F3B, 29-30).

F3C enseigne en classe préparatoire et est formateur à l'agrégation de physique (F3A, 104-105).

Genèse de la formation

Le stage de formation a été proposé pour la première fois l'année pendant laquelle les entretiens ont eu lieu (F3A, 4), à l'initiative de F3A.

110 L'analyse que nous proposons porte uniquement sur les propos tenus par les formateurs lors des entretiens.

Cependant, F3A nous a donné accès à de nombreux documents utilisés pendant ce stage, que nous n'avons pas pu analyser (la plupart d'entre eux ne pouvant pas être interprétés avec certitude de façon autonome, c'est-à-dire sans prise en compte des commentaires oraux qui accompagnaient leur diffusion lors de la formation).

Lorsque F3A a repris ses études pour passer l'agrégation après avoir enseigné 18 années en collège, elle se sentait particulièrement en difficulté en thermodynamique (en particulier sur les « formes d'énergie », « transferts d'énergie », et le « formalisme mathématique » ; F3A, 85-87). F3B lui donne les cours de thermodynamique de préparation à l'agrégation (F3B, 76-88, 93) et lui permet de mieux comprendre ce domaine scientifique (F3A, 88-89) ; F3A tombe sur un sujet de thermodynamique à l'oral de l'agrégation (F3A, 89-90).

Après avoir obtenu l'agrégation, F3A retourne enseigner une année au collège. Suite à la réforme de 2015, elle ne dispose pas encore des nouveaux manuels pour préparer ses cours. Elle utilise donc d'anciens manuels de collège et de lycée (F3A, 91-95) et prend conscience d'un « problème » dans l'enseignement de l'énergie dans le secondaire. Elle écrit alors un article au BUP (cosigné par F3B) pour expliquer « ce qui ne va pas » dans les manuels¹¹¹. Elle constate une absence de consensus sur les définitions, des confusions et un manque de rigueur (F3A, 108-110). Elle entre alors dans une démarche de « corriger toute ce qu'[elle a] lu », « de manière rigoureuse / scientifique / en se basant toujours sur le premier principe [de la thermodynamique] » (F3A, 101-102). Elle fait part à F3B et F3C de ses réflexions (F3A, 103-105).

Lors de son inspection consécutive à l'obtention de l'agrégation, il a été proposé à F3A de devenir formatrice à l'INSPÉ – proposition qu'elle a déclinée. Quelques années plus tard, elle a demandé à son inspecteur la possibilité de monter un stage de formation continue spécifique à l'enseignement de l'énergie, qui a vu le jour à l'automne 2022 (F3A, 60-66). Elle a recontacté F3B pour lui faire part de ce souhait et lui proposer d'intervenir pendant ce stage (F3B, 93-101).

C'est essentiellement F3A qui a conçu et préparé la formation, en faisant appel à F3B et F3C pour une relecture et une validation scientifique de ses propositions et pour l'animation de certaines parties de la formation (F3A, 514-518 ; F3B, 39-50) ; selon F3A, tous trois ont « essayé [ensemble] de construire une adaptation du premier principe pour le secondaire // et de proposer quelque chose qui éclaire l'enseignement de l'énergie et qui soit rigoureux scientifiquement » (F3A, 106-107).

Structure de la formation

Au cours de notre entretien, F3A a détaillé le contenu de l'ensemble du stage de formation, qui s'est déroulé sur deux journées non consécutives (F3A, 258-260). F3B n'a pas assisté à l'ensemble des demi-journées de formation ; il nous a décrit l'ensemble du stage de façon plus succincte (F3B, 361-369).

Pendant la première demi-journée de formation, les enseignants-stagiaires disposaient d'un questionnaire sous forme de diaporama auquel ils devaient répondre par groupes de quatre. Les questions s'appuyaient sur des extraits de manuels, pas toujours cohérents les uns avec les autres (F3A, 196-198). Il s'agissait par exemple de déterminer le nombre ou la nature des différentes formes d'énergie ou des différents types de transferts d'énergie (F3A 189-202). L'objectif était de faire émerger des questions plus que d'y répondre (F3A, 210-215).

111 Selon elle, il y a confusion entre le principe de conservation de l'énergie, qui « embrouille » (F3A, 98-99), et le principe de « conservativité de l'énergie », c'est-à-dire le premier principe de la thermodynamique (F3A, 99-100) ; nous y reviendrons lorsque nous décrirons le modèle scolaire de l'énergie présenté pendant de ce stage de formation.

L'après-midi de la première journée a été consacré à une présentation historique et scientifique du premier principe de la thermodynamique (F3A, 247-249) par F3B, sous la forme d'une conférence d'environ deux heures (F3B, 43-45).

Pendant la matinée de la seconde journée, F3C a proposé un « renforcement disciplinaire » au sujet du bilan radiatif de la Terre, suivi de la présentation d'un TP à ce sujet à destination d'élèves de Terminale (F3A, 262-270).

Pendant la dernière demi-journée du stage, les enseignants-stagiaires étaient invités à s'approprier les éléments théoriques donnés par F3B et F3C pour une application dans leurs enseignements. F3A a proposé des activités adaptées au public, essentiellement composé d'enseignants de lycée (F3A, 274-285).

12.2. Déterminants potentiels de l'activité des formateurs inférés par analyse des entretiens

Déterminants de nature institutionnelle

Nous avons vu précédemment que le changement de programme de physique-chimie de Cycle 4 de 2015 a été l'un des éléments qui ont poussé F3A à monter ce stage de formation (F3A, 91-95). F3A présente ce changement de programme comme un déclic qui lui a permis de prendre conscience de difficultés relatives à l'enseignement de l'énergie, dans un cadre plus large et plus global que celui de l'enseignement en collège.

Un modèle de l'énergie confus dans les manuels scolaires selon F3A

F3A prend conscience rapidement d'une absence de normes, d'une confusion entre les formes d'énergie et les transferts d'énergie au Cycle 4 dans les manuels scolaires (F3A, 108-110). En plus de cela, elle pointe également un manque de rigueur dans la détermination des systèmes pris en considération (F3A, 113-121) et souligne que ce problème est global ; il concerne également les manuels de lycée (F3A, 296-300) ainsi que les sujets du baccalauréat (F3A, 473-475).

Pour F3A, il y a des « fautes » dans les énoncés des manuels, et ce, particulièrement dans les parties qui concernent l'énergie (F3A, 349-355).

Un programme jugé confus, qui impose des normes considérées comme incorrectes par les formateurs

Lorsque F3B parle de programme de physique-chimie, il le juge « compliqué » et « confus » (F3B, 103-107).

En particulier, F3A et F3B évoquent la disparition du terme *chaleur* et son remplacement par l'expression *transfert thermique*. F3A évoque ce sujet à plusieurs reprises pendant notre entretien (F3B, 159-166 ; F3A, 478-490 ; 505-510) et expose les raisons pour lesquelles elle considère ce changement comme inopportun. En particulier, selon elle, l'expression « transfert thermique » véhicule l'idée fautive d'une modification de l'énergie thermique d'un système qui reçoit de l'énergie par transfert thermique (F3A, 113-118). F3B présente ce changement de terminologie comme spécifique à l'enseignement français (F3B, 159-166). Selon lui, les normes imposées par

l'institution scolaire, qu'il juge contraires à la physique, ont pour conséquence une perte de connaissances fondamentales chez les enseignants (F3B, 230-236).

Déterminants de nature sociale

Nous n'avons pas trouvé de traces de déterminants de nature sociale dans le discours de F3A et de F3B. Nous avons mis en évidence une dynamique entre les formateurs : F3A propose un contenu de formation, et elle le soumet à F3B et F3C pour expertise scientifique ; elle demande à F3B et F3C d'animer les parties de la formation les plus théoriques.

Nous pouvons également évoquer le besoin de normes partagées par la communauté enseignante pour l'enseignement de l'énergie dans le secondaire, qui a été évoqué par F3A (F3A, 296-300).

Connaissances professionnelles

Connaissances sur les stratégies d'enseignement de l'énergie

Pour aborder la conservativité de l'énergie (c'est-à-dire le fait que l'énergie soit une grandeur qui ne peut être ni créée ni détruite) et la distinguer de la conservation de l'énergie, F3A et F3B utilisent une image : celle de l'argent, qui peut occasionnellement se conserver (même valeur d'argent entre deux instants) mais n'est pas conservatif, puisqu'il est possible d'en créer ou d'en détruire (F3B, 290-305 ; F3A, 325-331).

Par ailleurs, pendant ce stage de formation, F3A propose une stratégie d'enseignement de l'énergie pour le secondaire : un « algorithme de résolution », qu'elle présente comme une adaptation du premier principe de la thermodynamique destiné à l'enseignement secondaire (F3A, 277-285). Il s'agit d'une méthode permettant d'effectuer des bilans d'énergie (identifier le système, identifier les variations d'énergie interne et les apports / retraits d'énergie externes, puis les équilibrer par application du premier principe de la thermodynamique).

Selon F3A, il est possible d'adapter le modèle scientifique de l'énergie à l'enseignement secondaire, par exemple en assimilant le travail électrique à une forme d'énergie au collège (F3A, 315-318). Cependant, pour F3A et F3B, les élèves de collège peuvent comprendre tôt dans leur scolarité les formes d'énergie (cinétique et potentielle), les transferts d'énergie (chaleur et travail), la conservation et la conservativité de l'énergie¹¹² :

« je dirais dès la 6^e // je pense qu'un élève il est capable de comprendre que // un système il peut recevoir de l'énergie sous forme de travail ou de chaleur // et // que // à l'intérieur d'un système il y a des formes d'énergie qui sont liées à la température / qui sont liées à la cohésion du système // au mouvement du système // à l'énergie potentielle à la position du système // en fait les enfants enfin les élèves ils comprennent assez bien hein » (F3A, 320-324)

« [la conservativité] je pense qu'on peut l'introduire dès le collège hein / parce que même au collège ils sont capables de comprendre la différence entre quelque chose qui varie parce qu'il y a un apport extérieur // et parce que tout simplement / et aussi parce que ça a été créé // ça ce n'est pas difficile je pense // tout le monde comprend ça » (F3B, 311-314)

112 Nous définirons ces propriétés de l'énergie dans la section suivante.

Par ailleurs, F3B considère que, pour enseigner l'énergie, il faut suivre son « développement historique » (F3B, 410-411).

Au-delà de l'énergie, il est convaincu qu'un bon apprentissage de la physique repose sur la patience, l'acceptation de ne pas tout comprendre, et le suivi du développement historique des concepts (F3B, 378-407).

Par ailleurs, certains propos tenus par F3B laissent entendre que, selon lui, il n'existe pas de *bonnes* stratégies d'enseignement qui puissent mettre en jeu un modèle scientifique *scolaire*, différent d'un modèle scientifique (F3B, 194-199). Le fait qu'il propose une même définition de l'énergie à tous les niveaux scolaires va également dans ce sens (F3B, 476-484).

Connaissances sur les stratégies de formation à l'énergie

Pour F3A, il est important que les enseignants-stagiaires « ose[nt] parler », dire « des bêtises » pendant la première partie du stage de formation (F3A, 216-218). Par la suite, les formateurs leur apportent des connaissances théoriques *de haut niveau* (F3A, 274-277). Cette stratégie a un effet déstabilisant sur les enseignants-stagiaires, qui sont alors dans des conditions favorables pour accepter les pistes pour l'enseignement apportées par les formateurs (F3A, 452-467).

Selon nous, le schéma décrit par F3A est assimilable à une stratégie de formation à l'énergie, et peut s'apparenter à une stratégie de formation plus globale¹¹³.

Connaissances sur les difficultés des élèves

Pendant les entretiens, nous avons demandé aux formateurs de nous parler des difficultés auxquelles sont confrontés les élèves de collège lorsqu'on leur enseigne l'énergie. F3A et F3B ont été déstabilisés par cette question, à laquelle il apparaît qu'ils n'avaient pas réfléchi auparavant.

Par la suite, F3B évoque des difficultés liées à l'existence d'un concept sociétal d'énergie, éloigné du concept scientifique d'énergie, et liées au fait que la compréhension de l'énergie nécessite de la patience – voire de l'abnégation (F3B, 378-427).

De son côté, après réflexion, F3A évoque de potentielles difficultés pour les élèves liées aux variations d'énergie :

« peut-être que là où il faut travailler au collège c'est sur la notion de variation d'énergie // voilà // quand on passe d'un état initial à un état final / l'énergie elle change // peut-être montrer l'exemple / qu'est-ce que c'est une variation / ça change voilà // donc on veut mesurer la variation d'énergie // c'est peut-être ça moi le / l'obstacle // après je pense que si on part sur des exemples concrets on peut arriver à des choses intéressantes // il y aurait beaucoup de choses à faire » (F3A, 370-375)

Connaissances sur les difficultés des enseignants

Selon F3B, les enseignants perdent certaines de leurs connaissances scientifiques de physique à cause de la pression de l'institution, ce qui les met en difficulté pour enseigner, notamment l'énergie (F3B, 230-236).

113 F3A n'ayant jamais proposé d'autres stages de formation, il ne s'agit que d'une hypothèse de notre part.

Il évoque également des difficultés liées au contenu du programme, qu'il juge confus (voir section précédente ; F3B, 103-107).

Selon F3A, les enseignants sont « gênés » par l'enseignement de l'énergie, sans qu'ils sachent pourquoi (F3A, 303-307). Elle met en avant des confusions qu'elle relève dans les manuels scolaires, notamment entre transferts et formes d'énergie, entre température et chaleur, entre sources et formes d'énergie, et évoque également l'absence de définition des systèmes (F3A, 113-121). En début de formation, elle prend appui sur ces exemples pour initier les débats entre enseignants-stagiaires : selon elle, les confusions pointées dans les manuels sont identifiables aux difficultés rencontrées par les enseignants (voir aussi F3A, 311-314).

F3A évoque également des difficultés relatives aux chaînes énergétiques, en particulier à l'absence de normes claires qui les régissent (F3A, 136-150 ; 153-159) ; ce sont des difficultés auxquelles elle est également confrontée (nous y reviendrons dans la section suivante).

Orientation pour l'enseignement des sciences

Dans son discours, F3B évoque à plusieurs reprises le besoin, selon lui, d'un enseignement des sciences dans le secondaire qui s'inscrit dans la continuité de l'enseignement des sciences dans le supérieur, dans le paysage scientifique international, et dans les enjeux de société actuels, comme le montrent les citations ci-après :

« clarifier ce que c'est que le concept d'énergie / apporter des outils pour le traiter en / en cours de façon efficace **sans être en rupture avec ce qui se fait ensuite dans le supérieur / et à une échelle plus large qui est la physique au niveau international** // et puis aussi / donner des clefs à ces enseignants-là pour que / les futurs citoyens / donc **leurs élèves actuels / aient toutes les / tous les éléments** pour savoir ce que c'est l'énergie et comment réfléchir **dans un débat / ou sur des problèmes de citoyenneté** ou de / **sociétaux** // puisque ça concerne aussi **l'écologie** / ça concerne au sens économies d'énergie je veux dire / et **énergies renouvelables** // donc l'énergie est au cœur quand même oui / à la fois de la physique // de // des débats de société // donc de l'avenir / et donc elle a une place essentielle dans l'enseignement » (F3B, 107-115)

« dans le secondaire / cette // distinction n'est pas faite // il y a une confusion entre les différentes formes d'énergie / ce qui fait que / **on enseigne souvent à des élèves de lycée / des relations / qui ne correspondent pas / d'une part au développement historique / et d'autre part à ce qui se fait en physique / de l'échelle nationale à l'échelle internationale** » (F3B, 135-139)

« il y avait un besoin pour ces gens-là / de / d'avoir des éclaircissements sérieux sur l'énergie / et surtout **des outils efficaces / pour l'enseigner sans être en rupture avec ce qui se fait ailleurs // dans le supérieur et puis ensuite en physique // en général** » (F3B, 243-245)

Buts et valeurs de l'éducation et de la formation

Comme nous l'avons montré, le stage de formation proposé par F3A et F3B comporte une forte dimension disciplinaire – ce que F3A qualifie de « renforcement disciplinaire » (F3A, 332-335) – qui apparaît comme un enjeu majeur dans la formation des enseignants.

F3A évoque également la création d'un groupe d'échanges regroupant les enseignants-stagiaires ayant participé au stage vision à long terme de la formation (F3A, 346-349). Selon nous, la création de ce groupe traduit une volonté d'accompagnement sur le long terme et de suivi dans le temps des effets de la formation sur les pratiques des enseignants formés.

12.3. Modèle scientifique scolaire de l'énergie : éléments spécifiques et caractéristiques de l'énergie

Dans cette section, nous recensons les caractéristiques attribuées à l'énergie et les éléments spécifiques au modèle de l'énergie proposé par les formateurs. Ces éléments sont peu nombreux : le modèle repose essentiellement sur les caractéristiques de transfert et de *conservativité* de l'énergie, ainsi que sur les différentes formes qu'elle peut prendre.

L'énergie : une grandeur physique associée à un système

F3A et F3B présentent l'énergie comme une grandeur, une fonction d'état associée à un système, comme le montre la définition que donne F3B à l'énergie, tous niveaux scolaires confondus :

« l'énergie est une grandeur une fonction d'état donc c'est une / une quantité qui vous permet de caractériser un système / d'accord ? de la même manière que la masse / de la même manière que la charge électrique // de la même manière que éventuellement son volume » (F3B, 476-479)

À plusieurs reprises, F3A évoque la définition des systèmes (38 occurrences pour « système » pendant l'entretien), « base » dont elle déplore l'absence dans les manuels scolaires (F3A, 120-121). Cette notion est nécessaire pour évoquer l'énergie et pour la réalisation de bilans énergétiques, qui sont, selon F3A, le principal objectif de l'enseignement de l'énergie à tous les niveaux scolaires (F3A, 123-127).

Caractère abstrait de l'énergie

Bien que F3A présente l'énergie comme une grandeur physique associée à un système, elle ne la considère pas comme une grandeur abstraite :

« alors / je sais que la réponse [à la question : quelle est la principale difficulté à laquelle les élèves sont confrontés quand on leur enseigne l'énergie en sciences physiques au collège?] est // c'est une grandeur abstraite // mais en fait moi je ne trouve pas ça si abstrait l'énergie hein » (F3A, 356-359)

Pendant notre entretien, F3B n'a pas évoqué le caractère abstrait de l'énergie.

Les formes d'énergie

F3B distingue deux formes d'énergie : l'énergie cinétique, liée à la vitesse, et les énergies potentielles. Selon lui, ce sont les seules formes d'énergie du modèle scientifique scolaire de l'énergie pour le collège (F3B, 446-448). Il évoque également l'énergie mécanique, qu'il oppose à l'énergie interne (F3B, 131-135). Selon lui, seule ces distinctions et ensembles de formes d'énergie sont « valides », et acceptables pour l'enseignement (F3B, 148-152).

F3A ne nous a pas proposé de liste des formes d'énergie, mais elle a mentionné à de nombreuses reprises les énergies thermique (7 occurrences¹¹⁴, à divers moments de l'entretien) et de cohésion (F3A, 425 ; 429 ; 499), en lien avec les changements d'état (F1A, 424-429). Elle évoque les énergies potentielle de position (à deux reprises¹¹⁴), cinétique ou de mouvement (voir ci-dessus) et lumineuse (une occurrence, F1A 368-369). Par ailleurs, F1A envisage qu'une forme d'énergie *électrique* puisse faire partie du modèle scientifique scolaire de l'énergie pour le collège, malgré le fait qu'il s'agisse d'un transfert et non d'une forme d'énergie (F3A, 315-318).

Les transferts d'énergie

F3A et F3B évoquent deux modes de transfert de l'énergie : le travail et la chaleur (« un système ne peut échanger de l'énergie que par chaleur ou par travail », F3B, 182), et ce à tous les niveaux scolaires :

« dès la 6^e hein / moi je dirais dès la 6^e // **je pense qu'un élève il est capable de comprendre que // un système il peut recevoir de l'énergie sous forme de travail ou de chaleur // et // que // à l'intérieur d'un système il y a des formes d'énergie qui sont liées à la température / qui sont liées à la cohésion du système // au mouvement du système // à l'énergie potentielle à la position du système »** (F3A, 320-324 ; voir aussi 404-418).

F3A pose la question de la nature d'un transfert associé au rayonnement :

« il y avait un grand débat entre prof de prépa et prof d'université // le double / quand vous avez l'énergie // quand vous mettez votre bras au Soleil // donc est-ce que c'est un transfert / il chauffe hein // donc est-ce que c'est un transfert d'énergie donc c'est un Q ou W ? / c'est ΔE / égale $MC \Delta T$ / égale Q ou / ou travail de rayonnement ? // oh la la // ça a été tout un // voilà // donc // et F3B il a écrit un article voilà il a // pour montrer que on peut dire les deux mais avant tout c'est un travail de rayonnement » (F3A, 537-542)

Dans son discours, elle évoque les travaux mécanique, électrique et de rayonnement.

Les deux formateurs évoquent à plusieurs reprises l'expression « transfert thermique », qui tend à remplacer le mot « chaleur » dans l'enseignement secondaire et supérieur français, et la jugent confuse et inutile (voir ci-avant, paragraphe relatif aux connaissances professionnelles).

Conservation et conservativité de l'énergie

Dans leur discours, F3A et F3B mettent en opposition la conservation de l'énergie et le premier principe de la thermodynamique, qu'ils appellent principe de *conservativité* de l'énergie – et non principe de *conservation* de l'énergie (F3A, 455-460). Selon eux, la conservation de l'énergie est une propriété *occasionnelle* de l'énergie, par opposition à sa *conservativité*, c'est-à-dire au fait que l'énergie ne puisse être ni créée, ni détruite (F3B, 327-333).

F3A considère le principe de *conservation* de l'énergie confus (F3A, 98-100), notamment parce qu'il laisse croire que l'énergie d'un système se conserve, or « on peut avoir un système où

¹¹⁴ Nous ne prenons pas en compte la liste des formes d'énergie issues des manuels qu'elle mentionne (F1A, 198-200), sans se prononcer sur leur pertinence.

l'énergie n'est pas conservée » (F3A, 145-146). Par ailleurs, selon elle, ce principe sous-entend qu'aucune *forme* d'énergie ne peut être créée ou détruite (F3A, 223-235).

Dans notre approche, d'après nos choix de vocabulaire (voir §2.3), la conservation de l'énergie n'est pas une propriété occasionnelle de l'énergie, mais est identifiée à ce que F3A et F3B appellent « conservativité de l'énergie » : entre deux instants, la quantité totale d'énergie ne varie pas, et ce quels que soient les instants choisis – l'énergie est une grandeur qui ne peut être ni créée, ni détruite.

Autres caractéristiques de l'énergie

Le mot *conversion* a été utilisé par F3A dans le sens que nous lui donnons, uniquement lorsqu'elle a évoqué les chaînes énergétiques (nous y reviendrons au prochain paragraphe). F3B ne l'a pas évoqué (aucune occurrence pour *conversion*, *convertir*, *convertisseur*).

F1A a employé à deux reprises le mot « transformation », soit dans le sens qui lui est habituellement donné en thermodynamique (F3A, 124-126), soit dans le sens de conversion – ou dans un sens commun (F3A, 137-141).

Des exemples de transformations et de conversions d'énergie ont été donnés marginalement au cours de nos entretiens ; par exemple, F3B évoque une transformation à laquelle on pourrait demander d'associer un bilan énergétique au collègue :

« je prendrai par exemple une // une balle qu'on fait tomber // voilà il y a une énergie cinétique au départ qui est nulle mais une énergie potentielle qui est maximale // et puis elle tombe elle fait un impact sur le sol sur du sable / l'énergie cinétique était maximale juste avant le choc et l'énergie potentielle proche de zéro // voilà et ça vous pouvez l'appliquer // à des // à // un moulin à eau par exemple » (F3B, 452-456)

Les chaînes énergétiques

Au cours de notre entretien, F3A a évoqué spontanément la possibilité d'utiliser des chaînes énergétiques dans l'enseignement secondaire, en pointant certaines ambiguïtés relatives à la nature de ce que représentent les flèches et à la nature des convertisseurs :

« il y a des ambiguïtés / on va dire / ah / l'énergie se conserve // se conserve // l'énergie se conserve // elle ne se détruit pas / elle ne se crée pas // donc ça veut dire que on a un système qui va / recevoir une certaine forme d'énergie et la transformer en une autre / ça c'est vrai pour un convertisseur d'énergie / euh // effectivement on peut / par exemple les convertisseurs électriques / on peut avoir une énergie qui se conserve c'est-à-dire // effectivement on peut avoir un alternateur // donc / oui / on peut avoir une conservation de l'énergie / et en fait il faut faire attention avec les / les conversions d'énergie // elles ont besoin d'être // comment **les chaînes énergétiques elles ont besoin d'être éclaircies / parce que dans une chaîne énergétique les flèches / est-ce qu'on met les formes d'énergie ? / les transferts d'énergie ? // le cercle / donc c'est le convertisseur d'énergie // mais on peut // c'est écrit dans les programmes là / on peut avoir un système où l'énergie n'est pas conservée / où elle reçoit / une énergie / un système qui reçoit une énergie sous forme // de travail ou de chaleur / et qui en libère / une autre sous forme de travail ou de chaleur et ce n'est pas conservé / donc // je ne sais pas si j'ai été claire là ? // les formes d'é / les les / les chaînes énergétiques /**

au collègue / on associe ça à la conservation de l'énergie / mais je pense qu'il faut faire attention » (F3A, 136-150)

Pour F3A, ces questions restent en suspens (F3A, 153-160 ; 533-537).

Elle évoque la possibilité d'utiliser des chaînes énergétiques en lycée, dans le but de représenter la conservation de l'énergie, et souligne qu'il faudrait alors utiliser des chaînes qui représentent les « stocks » d'énergie (F3A, 165-167).

Elle cherche des réponses aux questions relatives aux chaînes énergétiques dans les livres du supérieur, et ne considère pas ces chaînes comme un élément spécifique aux modèles scientifiques scolaires de l'énergie (F3A, 169-174).

Suite à notre entretien, F3A a continué ses réflexions sur les chaînes énergétiques, et a construit un document à ce sujet où elle expose des questionnements et des éléments de réponse – notamment la définition d'une conversion d'énergie pour la physique, le fait que certains systèmes présentés comme des convertisseurs sont des *transmetteurs* d'énergie, à l'instar d'engrenages et de pales d'éolienne.

F3B n'a fait aucune référence à des représentations schématiques pour l'énergie (sous forme de chaîne énergétique ou non).

Modèle scientifique et modèle sociétal de l'énergie, dégradation de l'énergie

Pendant notre entretien, F3A n'a jamais évoqué l'énergie sous un angle sociétal. F3B a, à plusieurs reprises, évoqué le concept sociétal d'énergie, en le mettant en lien avec la place qu'occupe actuellement l'énergie dans l'enseignement (F3B, 65-67 ; 107-115 ; 330-333 ; 339-342 ; 411-418 ; 433-437).

Malgré cela, au cours des entretiens, F3A et F3B n'ont jamais évoqué la dégradation de l'énergie (aucune occurrence pour *dégrader*, *dégradation*¹¹⁵, *dissiper*, *dissipation*, *perdes*). Nous n'avons pas pu déterminer de quelle manière F3B concilie l'idée de conservation – ou de conservativité – de l'énergie et les problématiques environnementales, qui sont, selon nous, indissociables de la propriété de dégradation de l'énergie (voir §3.1).

12.4. Conclusion

Le stage de formation F3 a été créé à l'initiative de F3A, dans une dynamique de partage de connaissances auprès de ses pairs. Elle a été confrontée à des difficultés pour apprendre l'énergie (préparation à l'agrégation) et pour enseigner l'énergie (initialement en collègue), qu'elle a mises en regard de nombreuses incohérences qui figurent, entre autres, dans les manuels scolaires.

F3A a fait appel à F3B et F3C pour animer les parties les plus théoriques du stage, relatives à la présentation et à l'application du modèle scientifique de l'énergie thermodynamique. Elle considère F3B et F3C comme des experts de ce modèle. Le stage comporte également des propositions

115 F3B mentionne le titre d'un livre dans lequel figure le mot « dégradation » (F3B, 395).

d'activités à mettre en place dans la classe, qui intègrent directement les éléments de connaissance apportés par F3B et F3C.

Le modèle de l'énergie proposé est calqué sur le modèle scientifique de l'énergie de la thermodynamique. Il ne prend pas en compte la puissance ; les phénomènes électriques et lumineux ne sont jamais évoqués par F3B (ils le sont marginalement par F3A). Ce modèle prend appui sur les formes, les transferts et les bilans d'énergie, et sur la conservativité de l'énergie, présentée comme sa propriété fondamentale. Nous n'avons pas relevé de caractéristiques de l'énergie spécifiques à l'enseignement secondaire. Par exemple, les transferts d'énergie considérés sont le travail et la chaleur (et ce dès le début du collège), et aucune représentation schématique n'est proposée pour les phénomènes énergétiques par les formateurs. Les chaînes énergétiques ne font pas partie du modèle évoqué, bien que F3A mentionne les difficultés qui leur sont associées, voire leur potentialité. Les formateurs ne mobilisent pas de connaissances sur les difficultés des élèves, ils ne proposent pas de modèle scientifique *scolaire* de l'énergie, ni d'adaptation du discours scientifique sur l'énergie pour un public de non spécialistes.

F3A et F3B partent du principe que les enseignants ont des difficultés à enseigner le concept d'énergie parce qu'ils ne maîtrisent pas le concept scientifique d'énergie. Les stratégies d'enseignement de l'énergie évoquées reposent sur un apprentissage précoce de la conservation de l'énergie (bilans d'énergie et conservation / conservativité de l'énergie dès le début du collège).

Le principe de dégradation de l'énergie n'est pas évoqué. Il n'est pas mis en lien avec le concept sociétal d'énergie, que F3A ne mentionne pas et auquel F3B fait référence à plusieurs reprises.

13. L'énergie vue par les formateurs F4A, F5A et F6A – analyse de pratiques déclarées

13.1. Quels formateurs, quelles formations ?

Les stages de formation F4, F5 et F6 ont été proposés par des *Maisons pour la science*, réseau « où collaborent scientifiques et pédagogues pour la mise en place d'actions de développement professionnel pour les enseignants du premier et du second degré en sciences et technologie »¹¹⁶. Selon le site Internet maisons-pour-la-science.org, les « *Maisons pour la science* proposent à l'échelle d'une académie en étroit partenariat avec le rectorat une offre de formation et d'accompagnement originale visant à aider les professeurs à pratiquer de manière active, attrayante et contemporaine les sciences et la technologie dans leurs classes »¹¹⁶.

Le réseau des *Maisons pour la science* est adossé à la fondation *La main à la pâte*, qui œuvre à la promotion des sciences en regroupant des enseignants, des scientifiques et des experts des sciences de l'éducation¹¹⁷.

Dans ce contexte, les formations F4, F5 et F6 présentent plusieurs points communs : en particulier, elles s'adressent à des enseignants de toutes disciplines (F4A, 139-148 ; F5A, 257-259 ; F6A, 443-448) et sont conçues pour créer du lien entre le monde de l'enseignement et le monde scientifique professionnel (entreprises, recherche, industrie).

Formation F4 et formatrice F4A

F4A a un doctorat en physique, dans l'optique atomique (F4A, 3). N'ayant pas envie d'enseigner la physique à un niveau « plus bas » que le doctorat (F4A, 15-16), et étant passionnée par la lecture, le théâtre et le dessin (F4A, 17-18), elle devient professeure des écoles, métier qu'elle exerce pendant dix ans (F4A, 10-11). Selon elle, l'enseignement de la physique dans le secondaire « enferme dans un domaine » (F4A, 19-20), contrairement à l'enseignement dans le primaire, polyvalent (F4A, 18).

Il y a dix ans, elle devient « ingénieure de formation » dans une *Maison pour la science* (F4A, 10-11). Dans ce contexte, elle participe à plusieurs formations pour formateurs, la plupart portant sur des thèmes spécifiques, comme l'« écomobilité », le « biomimétisme », l'« énergie », et une davantage axée sur la « formation de formateurs », relative à l'« enseignement des sciences fondé sur l'investigation » (F4A, 30-42).

F4A a animé deux formations sur l'énergie : une intitulée « Énergie, qui es-tu, que fais-tu, où es-tu ? » (F4A, 50 ; 65), à destination d'enseignants de cycle 3 et 4 (F4A, 66-67), qui a été remplacée il y a trois ans par une autre formation intitulée « Énergies d'aujourd'hui et de demain », davantage « axée sur la problématique de la transition énergétique » (F4A, 49-52) et à destination d'enseignants de collège et de lycée général et professionnel (F4A, 67 ; 72-73), de toutes disciplines (elle mentionne les sciences physiques, les sciences de la vie et de la Terre, la technologie, l'histoire-géographie, l'anglais, les professeurs documentalistes ; F4A, 139-148). La plupart des

116 <https://maisons-pour-la-science.org/a-propos/presentation-du-reseau-maisons-pour-la-science>

117 <https://fondation-lamap.org>

enseignants qui participent à ces formations sont des enseignants de sciences – mais pas uniquement de sciences physiques (F4A, 149-152).

Formation F5 et formateur F5A

Après avoir obtenu un DUT en mesures physiques (F5A, 133-134), F5A a travaillé en tant que technicien supérieur au CNRS, puis à la recherche et développement d'EDF (F5A, 135-137). Il a ensuite fait l'École normale d'instituteurs (F5A, 139), et est devenu « assez rapidement » formateur en formation initiale en IUFM (F5A, 140-144), puis conseiller pédagogique (F5A, 144). Par la suite, il a passé et obtenu le CAFIPEMF, « diplôme pour devenir formateur » (F5A, 163-165) et a validé un master de didactique des sciences physiques et chimiques (F5A, 146-147).

F5A a intégré la fondation *La main à la pâte* il y a 12 ans (F5A, 152-154), essentiellement en tant que responsable du développement professionnel (F5A, 155), c'est-à-dire de la formation des enseignants (F5A, 156). Il a été responsable de « monter tout ce qui concernait les questions de développement professionnel » lors de la création du réseau des *Maisons pour la science* (F5A, 155-158) et est actuellement responsable de la plateforme de e-learning de *La main à la pâte* L@map (F5A, 158-160 ; 2).

F5A a également organisé des formations de formateurs pour les formateurs des *Maisons pour la science*, notamment relatives à l'énergie (F5A, 198-203).

Les formations d'enseignants (de type formation académique) ne sont pas son cœur de métier (F5A, 207 ; 208-210), mais il anime ponctuellement des stages de formation dans des régions où il n'y a pas de *Maison pour la science*, ou dans lesquelles une *Maison* est en train d'émerger (F5A, 215-217).

F5A se dit passionné par les sciences et par la pédagogie (F5A, 148-151 ; 222-223).

Formation F6 et formateur F6A

F6A a suivi un parcours universitaire en physique (licence, maîtrise, DEA, thèse). Il a obtenu un poste de Maître de Conférences, puis est devenu Professeur des Universités (F6A, 3-10) : il est actuellement enseignant-chercheur, spécialisé dans la physique nucléaire expérimentale (« physique subatomique pour l'étude de la structure nucléaire ») (F6A, 11-14).

Il a animé un atelier scientifique en collège pendant une dizaine d'années, sur demande du rectorat et en collaboration avec un enseignant de physique-chimie (F6A, 17-20 ; 36-37). Il a également donné des conférences à destination de lycéens, portant sur les « parcours de l'université » et en lien avec la SFEN (Société Française à l'Énergie Nucléaire) (F6A, 45-47).

F6A a participé à un séminaire d'une semaine en Angleterre qui lui a permis d'avoir connaissance de « ce qui se faisait en Angleterre pour voir si ça pouvait s'appliquer ou non au système français », ce qui a abouti à la proposition d'une structure pour les *Maisons pour la science* et pour les formations associées (F6A, 71-74). Il a participé à la création de l'une des deux premières *Maisons pour la science* en 2012 (F6A, 50-51 ; 56-57 ; 67-68), dont il fait encore partie et pour laquelle il conçoit et anime des formations (F6A, 85-87 ; 74-80).

Déroulement des formations

Les stages de formation proposés par F4A et F6A ont une structure similaire. Ils se déroulent sur une (F6) ou deux (F4) journées, et se terminent par la visite d'une entreprise, d'un laboratoire ou d'un site industriel en lien avec l'énergie (F6A, 361-363), par exemple une centrale nucléaire (F4A, 112) ou un site Total (F4A, 113). Au début du stage, les formateurs proposent aux enseignants-stagiaires de résoudre une tâche à la manière d'un élève (mais en mettant en œuvre leurs propres connaissances¹¹⁸). Le choix de cette tâche est en lien avec la visite qui sera effectuée par la suite (F4A, 113-115 ; F6A, 338-352). Après qu'ils ont résolu la tâche, des apports scientifiques sont proposés aux enseignants-stagiaires. Ces apports, de nature théorique et en lien avec des « activités pour les élèves » (F4A, 118-120), peuvent être dispensés par des « scientifiques » (F4A, 258-264) ou par le formateur que nous avons interrogé (F6A, 359-361). Ils se font à travers des « mises en situation » « concrètes » (F4A, 123-129).

F5A propose un stage qui ne comporte pas de visite, mais dont la structure est proche de celle que nous venons de décrire. Le stage F5 commence par une mise en situation de type « démarche d'investigation niveau adulte » (F5A, 280), à caractère expérimental et pendant laquelle le formateur n'évoque pas l'énergie. Elle est suivie par un « éclairage scientifique », qui permet de « faire le lien entre l'énergie » et cette tâche (F5A, 278-283). Les enseignants-stagiaires sont ensuite amenés à réfléchir à la mise en place de cette activité dans leurs classes, en prenant appui sur une analyse de vidéos de séances en classe (F5A, 299-305) ; nous y reviendrons plus en détail au §13.3.

13.2. Analyse des pratiques déclarées de F4A

Dans cette section, nous présentons les déterminants potentiels de l'activité de F4A, puis nous les mettons en regard du contenu du stage de formation et du modèle de l'énergie auquel elle fait référence.

Déterminants potentiels de l'activité de F4A

Les déterminants potentiels de l'activité de F4A que nous avons relevés sont essentiellement de nature personnelle : nous n'avons pas relevé de trace de contraintes sociales dans son discours, et elle évoque peu d'éléments institutionnels contraignants.

Composante institutionnelle

F4A mentionne le fait que l'énergie est un thème « très présent dans les programmes » des écoles, de collège et de lycée (F4A, 59-62), raison pour laquelle ce thème de formation fait partie de l'offre de la *Maison pour la science*.

Elle justifie la structure de la formation F4A par des raisons institutionnelles liées au réseau des *Maisons pour la science* : la mise en situation initiale proposée aux enseignants-stagiaires est de type « La main à la pâte » (F4A, 89) ; les « rapprochements privilégiés entre le monde de l'éducation et le monde de la recherche » favorisés dans cette formation le sont du fait de la structure des *Maisons pour la science* (F4A, 7-9).

118 Pour les enseignants, il ne s'agit pas d'imiter ce que ferait un élève confronté au même exercice.

Connaissances professionnelles

Connaissances sur les stratégies de formation

Les stratégies de formation évoquées sont liées à la structure à laquelle est adossée la formation. Elles sont de nature institutionnelle plus que personnelle : il s'agit de former ensemble des enseignants spécialistes de différentes disciplines et de différents niveaux scolaires, en mettant en lien l'enseignement et le monde professionnel scientifique.

La stratégie de formation choisie n'est pas centrée sur le concept scientifique d'énergie : pour F4A, bien que cette formation permette de « mieux cerner le concept d'énergie », ce n'est pas le cœur de la formation (F4A, 75).

Connaissances sur les difficultés des élèves

F4A met en avant deux difficultés liées à l'apprentissage du concept d'énergie (F4A, 173-180) :

- c'est un concept abstrait, difficile à appréhender par les élèves (F4A, 84-86) ;
- l'énergie est enseignée dans plusieurs disciplines scolaires (physique-chimie, SVT, technologie), déconnectées les unes des autres (F4A, 92-94).

Connaissances sur les difficultés des enseignants

Selon F4A, les enseignants ont des difficultés pour enseigner l'énergie dans un cadre pluridisciplinaire (F4A, 132-133) et « sous l'angle du développement durable » (F4A, 136-138). Par ailleurs, le caractère abstrait de l'énergie entraîne des difficultés pour son enseignement (F4A, 83-86).

Orientation pour l'enseignement des sciences

F4A évoque à plusieurs reprises la « transition énergétique », qu'elle voit et qu'elle présente comme un objet d'enseignement interdisciplinaire (F4A, 55-56) et un enjeu d'actualité particulièrement important (F4A, 51-52 ; 55).

Selon elle, l'objectif majeur de cette formation est de « comprendre le concept d'énergie et les enjeux qui y sont rattachés » (F4A, 79-80), qui concernent le « développement durable [et la] dynamique (...) de transition énergétique (...) actuelle » (F4A, 77-79).

Cet objectif de formation peut être élargi et considéré comme une orientation voulue pour l'enseignement des sciences en général, notamment en lien avec les objectifs généraux de formation portés par la fondation *La main à la pâte* et le réseau des *Maisons pour la science*.

Modèle scolaire de l'énergie

Pendant notre entretien, F4A a évoqué certaines caractéristiques fréquemment associées au concept scolaire d'énergie : les formes d'énergie et les conversions d'énergie. La quantification de l'énergie, sa conservation, sa dégradation, les transferts, les transformations d'énergie et la puissance n'ont pas été évoqués.

Définition de l'énergie et formes d'énergie

F4A définit l'énergie comme quelque chose qui permet la survenue d'un changement (F4A, 246-250), en cohérence avec la définition la plus consensuelle de l'énergie pour l'enseignement¹¹⁹. À travers cette définition, elle évoque différentes formes d'énergie – sans les nommer (voir aussi F4A, 123-124).

Conversions d'énergie et chaînes énergétiques

F4A évoque des « conversions de formes d'énergie » (F4A, 124), présentées et représentées en sciences physiques et en technologie sous deux angles différents :

« l'approche est différente // où en sciences physiques on va passer d'une forme à une autre / alors que ce qui les / et puis donc de voir comment elle se convertit / de voir les convertisseurs / alors que les profs de techno sont plus sur des verbes d'action au niveau de de des objets sur leur fonction / et que donc l'approche n'était pas la même pour en fait *in fine* traiter quand même que on avait des conversions d'énergie » (F4A, 214-218)

Selon elle, il existe deux sortes de chaînes énergétiques : celles des sciences physiques et celles de la technologie, qui relèvent de règles différentes, mais qui représentent les conversions d'énergie (F4A, 221-231). F4A évoque les différences entre ces chaînes, mais elle ne note pas d'hétérogénéité particulière parmi les chaînes utilisées en sciences physiques (F4A, 229-230 ; 265-268 ; 285-287).

L'énergie : un objet sociétal

À travers cette formation, F4A souhaite donner les outils pour « débattre de la question de l'énergie // aujourd'hui dans nos équipes (...) // dans notre usage quotidien de l'énergie (...) dans ce débat sociétal » (F4A, 158-159 ; 163). Selon elle, l'objectif d'un enseignement de l'énergie au collège est « qu[e les élèves] comprenne[nt] que derrière toute activité humaine il y a de l'énergie // qu'elle peut prendre différentes formes // qu'on a des sources d'énergie qui sont plus ou moins impactantes pour notre environnement » (F4A, 237-239).

Le plus souvent, F4A parle de l'énergie comme d'un objet sociétal, de consommation. C'est une nécessité, une réponse à un besoin, comme le montrent les citations ci-après :

« dès que j'ai le moindre changement // quel qu'il soit **je vais avoir besoin d'énergie** » (F4A, 249-250)

« **on a besoin de l'énergie** pour / pour les transports pour l'habitat pour l'alimentation on vient de le dire // pour toute activité humaine » (F4A, 97-98)

« notre usage quotidien de l'énergie » (F4A, 159)

« toute modification physique quelle qu'elle soit **nécessite de l'énergie** » (F4A, 245)

Dans la citation suivante, nous remarquons que F4A met sur le même plan l'« énergie fossile », l'« énergie nucléaire », l'« éolien » et le « photovoltaïque », sans faire de distinction claire entre formes d'énergie, sources d'énergie et moyens techniques permettant les conversions d'énergie :

« donc ça c'est par rapport au concept // et puis bah les enjeux c'est que quand même il y a une / enfin on a besoin de l'énergie pour / pour les transports pour l'habitat pour l'alimentation on vient de le dire // pour toute activité humaine / et que / et que bah voilà essentiellement // alors dans le monde c'est un peu moins vrai parce qu'on est un peu

119 voir §3.1 : Grandeur qui caractérise la capacité d'un système à effectuer un changement.

écranés par / par le nucléaire en électricité mais **l'essentiel** // voilà **de l'énergie actuellement elle est / elle est faite à partir de / d'énergies fossiles** et / et que donc ça pose des problèmes au niveau réchauffement climatique et que donc ce qu'on étudie en fait dans la formation énergies d'aujourd'hui et de demain / on part avec un chercheur d'une hypothèse qui est **est-ce qu'on pourrait s'affranchir des énergies fossiles** / et donc / **et de l'énergie nucléaire** d'ailleurs / postulat de départ et donc de tout faire avec de l'éolien et du / et du photovoltaïque / et donc on développe toute une modélisation / de ce qu'il faudrait faire en terme de capacités / pour avoir la même énergie disponible / donc on se rend compte voilà de / du dimensionnement de ce qu'il faudrait et donc de la nécessité de **réduire à la fois la consommation et de développer le stockage** de l'énergie / donc ça c'est notre entrée // » (F4A, 96-109)

De la même manière, elle évoque les « énergies » renouvelables et non-renouvelables, qu'elle ne distingue pas des sources d'énergie (F4A, 124-125).

Elle associe les conversions d'énergie à l'utilisation de l'énergie (F4A, 124-125), c'est-à-dire à sa consommation (F4A, 108).

Une formation interdisciplinaire, un concept transdisciplinaire

Pendant l'entretien, F4A évoque plusieurs modèles scientifiques scolaires de l'énergie, qui, bien que modèles d'un même concept, diffèrent selon les disciplines. Elle ne privilégie aucun de ces modèles, et ne les décrit pas. Elle évoque certaines différences entre le modèle utilisé en technologie et celui des sciences physiques (conversions d'énergie, chaînes énergétiques – voir ci-dessus). Pendant la formation, les enseignants de chaque discipline mobilisent leur propre modèle : l'objectif est de faire du lien entre ces modèles (F4A, 92-93) entre lesquels, habituellement, « il n'y a pas vraiment des passerelles » (F4A, 93).

Dans la version précédente de ce stage de formation, la chaîne énergétique était évoquée comme un exemple de codifications propres à chaque discipline. L'objectif de formation était de faire prendre conscience aux enseignants-stagiaires de la coexistence de plusieurs types de représentations pour un même phénomène (notamment en physique et en technologie).

13.3. Analyse des pratiques déclarées de F5A

Structure de la formation

Le stage de formation proposé par F5A tourne autour d'une démarche d'investigation :

« c'est // une situation qui fait appel à // à **des lâchers de bille dans de la semoule** donc c'est un peu une référence (...) à des cratères et des météorites // et du coup la situation expérimentale est celle-là et donc les gamins (...) doivent // **essayer de trouver quels sont les paramètres // pertinents qui déterminent la / le diamètre du cratère formé par la bille** » (F5A, 56-59)

Dans un premier temps, les enseignants-stagiaires doivent effectuer eux-mêmes cette démarche d'investigation, et découvrir que les deux paramètres « pertinents » sont la hauteur du lâcher et la masse de la bille (F5A, 61-63 ; 278-283).

Le concept d'énergie est présenté par le formateur, comme un concept abstrait, mathématique et inventé par l'homme (F5A, 287-299). Les formes d'énergie cinétique, potentielle et mécanique sont alors introduites (F5A, 63-68).

Les enseignants-stagiaires sont ensuite amenés à répondre à des questions expérimentales afin de « faire fonctionner le concept » (F5A, 68-74), puis le formateur propose d'analyser des vidéos dans lesquelles on voit un enseignant mettre en place cette séance dans sa classe (F5A, 299-305).

Bien qu'elles ne semblent pas faire partie du stage qu'il propose, F5A évoque également d'autres pistes pour cette formation :

- une réflexion sur une progression de l'enseignement de l'énergie mécanique au collège ;
- l'utilisation d'autres dispositifs expérimentaux qui mettent en jeu les mêmes formes d'énergie, par exemple en faisant « rouler des billes [sur] des rampes incurvées » (F5A, 85) ;
- la possibilité d'aborder d'autres formes d'énergie, comme l'énergie thermique, en lien avec les « transformations de la matière » et les changements de température (F5A, 89-96).

Déterminants potentiels de l'activité de F5A

Nous n'avons pas repéré de contraintes sociales dans le discours de F5A – en dehors du fait qu'il anime la formation F5 « pour donner un coup de main » et aider au montage d'une *Maison pour la science* régionale (F5A, 28-30).

Composante institutionnelle

Pour F5A, le fait que cette formation soit dispensée par *La main à la pâte* implique qu'elle ait une dimension expérimentale ou de modélisation (F5A, 39-42). Il évoque également la mise en relation entre le monde de l'enseignement et le monde professionnel mise en avant dans les *Maisons pour la science*, qu'il présente comme moins contraignante (F5A, 193-197).

L'animation du stage de formation F5 par F5A répond à une demande académique (F5A, 208-211).

F5A souligne que « le temps qui nous est laissé dans des formations en présentiel est beaucoup trop court » (F5A, 34-35), sans préciser qui, de l'académie ou de l'organisme de formation, est à l'origine de cette contrainte.

Connaissances professionnelles

Connaissances sur les stratégies de formation

F5A présente un intérêt particulier pour les formations à la formation d'enseignants, à la fois en tant que formateur et en tant que formateur de formateurs (F5A, 166-179 ; 198-203).

Il a participé à l'élaboration de ce stage de formation et, de façon plus large, de tout ce que propose la fondation *La main à la pâte* pour l'enseignement de l'énergie : F5A dit avoir contribué à « échafauder (...) toute une stratégie // pour (...) former à la thématique de l'énergie » (F5A, 33-34).

Dans ses activités pour la fondation *La main à la pâte*, F5A promeut un modèle de formation clef en main pour l'enseignant (F5A, 8-10 ; 12-17).

De la même manière, pendant le stage de formation, les enseignants-stagiaires sont invités à « tester » des activités à destination d'élèves directement fournies, ce qui leur permet par la suite de gagner du temps dans la transposition de ces activités dans leurs classes (F5A 103-105).

La stratégie de formation consiste à faire faire aux enseignants-stagiaires quasiment les mêmes activités que celles qui sont destinées à leurs élèves, mais en utilisant leurs propres raisonnements (F5A, 100-108). Ici, l'accent est mis sur les erreurs possibles des enseignants plutôt que sur les erreurs potentielles de leurs élèves ; les formateurs n'informent pas les enseignants-stagiaires qu'ils font une activité à destination d'élèves (F5A, 115-124).

Selon F5A, la formation des enseignants devrait aussi passer par plusieurs mois de travail dans le un milieu professionnel scientifique, en dehors de l'enseignement (F5A, 234-238).

Connaissances sur les stratégies d'enseignement

F5A promeut un enseignement des sciences basé sur l'investigation, dans la lignée des orientations choisies par la fondation *La main à la pâte* (F5A, 40-43). Cependant, il présente l'énergie comme un concept qui ne peut pas être « découvert » par les élèves, dans le sens où il ne peut pas être mis en évidence de façon expérimentale (F5A, 49-50 ; 243 ; 298-299).

Il recommande donc une stratégie d'enseignement de l'énergie basée sur une démarche d'investigation, mais qui comporte des apports théoriques relatifs à l'énergie, qu'il juge nécessaire (voir paragraphe précédent : *Structure de la formation*).

Selon F5A, l'expérimentation qu'il propose aux enseignants-stagiaires permet de « préparer un terrain propice à (...) la compréhension » du concept d'énergie (F5A, 48-54 ; 248 ; 249 : « vous aurez / vous aurez gagné une grande bataille // en le faisant comme ça »).

Connaissances sur les difficultés des élèves

F5A évoque deux difficultés majeures auxquelles sont confrontés les élèves lorsqu'ils apprennent le concept d'énergie : la difficulté de comprendre la conservation de l'énergie (F5A, 335-336) et la polysémie du mot « énergie », qui ne prend pas le même sens en physique et dans la vie quotidienne (F5A, 339-342).

Connaissances sur les difficultés des enseignants

Pour F5A, la principale difficulté dans l'enseignement de l'énergie est en lien avec le caractère abstrait de l'énergie, qui ne peut pas être mis en évidence de façon expérimentale (F5A, 42-43 ; 48-50). Il souligne deux autres difficultés auxquelles sont confrontés les enseignants en sciences, qui ne sont pas spécifiques à l'enseignement de l'énergie : un défaut de connaissances scientifiques (F5A, 117-124) et un défaut de connaissances de la nature de la science (F5A, 232-235).

Modèle scientifique scolaire de l'énergie

L'énergie : une abstraction mathématique

F5A présente l'énergie comme un concept ne pouvant pas être mis en évidence de façon expérimentale (voir ci-avant), et particulièrement complexe (F5A, 48-49 ; 243 ; 256-257).

Il présente l'énergie comme un concept abstrait, mathématique, inventé par l'homme (F5A, 287-299).

Un concept multidisciplinaire

Le concept d'énergie est présent dans plusieurs disciplines scolaires, en particulier en physique, mais aussi en technologie et biologie :

« clarifier un petit peu / ce concept d'énergie qui n'est pas évident même **pour les physiciens** // et les **profs de techno** qui l'utilisent des fois on a des **profs de bio** aussi qui viennent / voilà / clarifier le concept / un peu **les ramifications qu'il a dans toutes les disciplines** // » (F5A, 256-258)

Ces propos peuvent être interprétés comme la coexistence de plusieurs modèles scientifiques scolaires associés aux différentes disciplines ; F5A n'en privilégie aucun *a priori*.

Autres caractéristiques de l'énergie

Pendant l'entretien, F5A mentionne plusieurs formes d'énergie : les énergies cinétique, potentielle et mécanique (F5A, 65-80), l'« énergie thermique » (F5A, 92 ; 93) et l'« énergie de rayonnement » (F5A, 93).

Le seul transfert d'énergie qu'il évoque est le « transfert d'énergie thermique », qu'il associe à un « changement de température » (F5A, 95-96), ce qui n'est pas conforme aux savoirs de la physique (chap.2).

Les conversions d'énergie sont évoquées à deux reprises, dans le sens de *transformation* d'énergie (« conversion » de l'énergie cinétique en énergie potentielle : F5A, 65 ; 81), puis dans un sens qui n'est pas clairement défini :

« c'est compliqué de comprendre // que l'énergie existe en quantité finie dans l'univers // et que **l'énergie ne fait que passer d'une forme à une autre** // et qu'on n'a pas de gain ni de perte d'énergie donc toujours conservation de l'énergie ça » (F5A, 329-332)

Il évoque des « transformations d'énergie » et des « transformations de la matière » ou « de mouvement » (soulignage ci-dessous), dans un sens *a priori* assimilable à celui de « changement » :

« l'énergie elle existe quoi qu'il arrive / en quantité finie / et les résultats que vous allez observer c'est des transformations d'énergie c'est-à-dire que / que l'énergie était là avant // elle / elle arrive sous une certaine forme qui permet de voir des transformations de la matière de mouvement des / d'autres transformations / et elle est toujours là mais sous une autre forme // » (F5A, 345-349)

Dans les deux citations précédentes, F5A évoque la conservation de l'énergie, en lui donnant le sens que nous lui attribuons (invariance de la quantité totale d'énergie au cours du temps) (voire aussi F5A, 352-359).

Lorsque nous lui demandons une définition de l'énergie, F5A lui associe « un ensemble d'attributs » : la conservation et les changements de formes, et mentionne également les ressources d'énergie, qu'il qualifie de « réservoirs » qui « stockent » de l'énergie (F5A, 354-361).

La dégradation de l'énergie ne fait pas partie de ce modèle, tout comme la puissance – et la notion de transfert n'est pas au cœur de ce modèle : il est possible qu'elle n'en fasse pas partie, l'expression « transfert de l'énergie thermique » renvoyant alors à l'idée de *transport* de l'énergie.

Conclusion de section

Au cours de notre entretien, F5A a évoqué de nombreuses stratégies de formation, d'enseignement, en lien avec des difficultés auxquelles sont confrontés les enseignants. La grande majorité de ces connaissances professionnelles concernent les sciences en général : elles ne sont pas spécifiques à l'enseignement, à l'apprentissage ou à la formation à l'énergie.

F5A présente l'énergie comme un concept abstrait, associé à des ressources ou à des « réservoirs », qui peut prendre plusieurs formes, qui peut changer de forme et dont la quantité se conserve au cours du temps.

Cependant, le modèle scientifique scolaire de l'énergie appliqué¹²⁰, *mobilisé pendant la formation F5*, ne recouvre pas l'ensemble de ce modèle initial. Seules les formes d'énergie cinétique, potentielle et mécanique sont évoquées et mobilisées. Pendant ce stage de formation, le modèle scolaire de l'énergie utilisé par les enseignants-stagiaires est un modèle spécifique, de la physique, associé en particulier à la mécanique. Il est présenté par F5A comme introductif, permettant de découvrir ce qu'est le concept d'énergie.

Ce stage de formation est à destination d'enseignants de disciplines diverses, or le caractère unificateur de l'énergie (au-delà du domaine de la mécanique) n'est pas évoqué : tout se passe comme si les modèles scientifiques scolaires de l'énergie (toutes disciplines confondues) prenaient appui sur le modèle scientifique de l'énergie *de la mécanique*.

13.4. Analyse des pratiques déclarées de F6A

Déterminants potentiels de l'activité de F6A

Nous avons repéré peu de déterminants sociaux dans le discours de F6A. Nous notons cependant une volonté de créer du lien entre le monde de la recherche et les élèves en difficulté (F6A, 30-32), une volonté de proximité avec les élèves (F6A, 27-29), et le fait que le laboratoire où travaille F6A et le collège de secteur se trouvent dans un même lieu géographique (F6A, 32-34).

Composante institutionnelle

F6A évoque plusieurs contraintes de nature institutionnelle, liées aux *Maisons pour la science*, aux relations entre le rectorat et la fondation *La main à la pâte* et au programme scolaire.

En ce qui concerne les *Maisons pour la science*, il souligne qu'elles promeuvent la formation des enseignants en lien avec le monde de la recherche (F6A, 448-453).

F6A précise que, pour qu'une formation puisse être proposée au Plan Académique de Formation de la région, il faut qu'elle soit proposée par la fondation *La main à la pâte* et acceptée par le rectorat (F6A, 89-93). Il ajoute que, selon les années, certains types de formations sont privilégiés par le rectorat par rapport à d'autres :

¹²⁰ Il s'agit d'un modèle appliqué déclaré.

« il y a eu des / des directives à un moment donné où c'était plus (+) axé sur // la vocabulaire le français et les mathématiques // donc les sciences à un moment donné / enfin sciences physiques / chimie / et technologie ont été mis un peu de côté donc là / je pense aller ça faisait // 17 formations à peu près / dans l'année à ce moment-là mais ça s'était pendant une période de deux trois ans // le reste du temps c'est entre 10 et 15 // » (F6A, 96-100)

Au cours de notre entretien, F6A a à plusieurs reprises évoqué les programmes scolaires. Il nous a fait part de son incompréhension quant à la « disparition » des forces du programme de collège (F6A, 283-286). Selon lui, le programme de physique de lycée est « très ambitieux » (F6A, 301), mais creux, « complètement survolé »¹²¹ (F6A, 309-310).

Connaissances professionnelles

Connaissances sur les stratégies d'enseignement

F6A évoque plusieurs stratégies d'enseignement de l'énergie, dans une optique *sociétale*.

Il considère que les élèves ont besoin d'être guidés pour trier les informations relatives à l'énergie, qui sont nombreuses (voir F6A, 379-385, et en particulier 384-385 : « je ne sais pas comment un élève de de collège enfin de quatrième troisième / arrive à s'en sortir avec toute / avec cette somme d'informations »).

Selon lui, l'enseignement de l'énergie manque d'objectivité scientifique. Pour parvenir à un bon enseignement de l'énergie, il préconise de « bannir » ses « opinions (...) politiques ou autres ». Alors, « tout le monde serait d'accord », il y aurait « une vraie vue d'ensemble (...) des différents avantages et inconvénients de chaque moyen de production d'électricité ou de consommation d'énergie », ce qui permettrait d'apporter « une explication, une vue d'ensemble et des réponses aux questions aux élèves / de façon objective » (F6A, 288-294).

F6A décrit également la manière dont l'énergie doit être enseignée en tant que concept scientifique. Selon lui, elle s'enseigne après les quatre forces fondamentales (ce qui n'est pas une nécessité objective, voir §3.3), et en lien avec ces forces, auxquelles on associe un travail, une forme d'énergie et une source d'énergie (qui, à notre connaissance, ne sont pourtant pas directement liés les uns aux autres) (F6A, 408-416).

121 Citation complète : « je trouve les programmes scolaires // très ambitieux sur le papier // compliqués à mettre réellement en œuvre en classe // je // voilà je trouve qu'on survole beaucoup trop de choses mais elles ne sont que survolées // ça m'est enfin voilà on travaille aussi on essaye de faire le lien surtout depuis la réforme / du baccalauréat de faire des liens entre le lycée et l'université // quand je prends un livre de terminale ou même de première en physique // mais je me dis / l'élève qui maîtrise de A à Z tout le bouquin / mais c'est un génie enfin je veux dire il rentre tout de suite en deuxième ou troisième année d'université // sauf que la façon dont / dont on présente les choses / mais c'est complètement survolé // il y a eu un / c'était il y a quelques années il y a eu au baccalauréat un / un sujet de physique sur le boson de Higgs // au baccalauréat // et ce ce / il n'y avait rien de physique c'était une explication de texte qu'il fallait faire // et et et ça je / voilà je je trouve que c'est / c'est bling bling / les programmes sont / sont sont très attrayants très sexy comme ça / mais quand on creuse il n'y a rien derrière // et et et je / je trouve ça très regrettable // voilà / donc euh oui je pense qu'ils sont orientés après ça me paraît important que que / que les programmes répondent à des / à des faits de société / je / donc c'est / il est important de parler de l'énergie du climat et cætera c'est / on est bien d'accord que en collège / enfin même à l'école primaire hein c'est très important mais de grâce faisons-le de façon construite / et / et pas arriver voilà au boson de Higgs enfin c'est l'exemple qui me vient en tête mais je sais qu'il y en a d'autres / » (F6A, 301-317)

Il n'envisage pas d'autre manière pour aborder l'énergie (F6A, 430-436), et considère que cette présentation et définition de l'énergie est « faisable » en collège, à condition d'avoir défini les forces auparavant, ce qui est hors programme actuellement (F6A, 417-429).

Connaissances sur les stratégies de formation

Selon F6A, les formations proposées par les *Maisons pour la science* sont construites par un binôme constitué d'un enseignant du secondaire et d'un enseignant chercheur (F6A, 73-83).

F6A évoque les stratégies de formation habituellement mises en œuvre dans les *Maisons pour la science* : une mise en situation qui amène à un débat sur le sujet de la formation (F6A, 333-334) suivie d'un « éclairage scientifique », puis de la visite d'un laboratoire ou d'un site industriel (F6A, 359-363), jugée particulièrement intéressante par les enseignants-stagiaires (F6A, 262-264).

La mise en situation choisie pour une formation qui porte sur l'énergie peut être la lecture d'un article d'un quotidien national ou la prise de mesures de radioactivité à l'aide de détecteurs (F6A, 339-352). Ces mises en situations sont interchangeable, mais peuvent être liées à la visite prévue : par exemple, la visite d'une centrale nucléaire est précédée de mesures de radioactivité.

Connaissances sur les difficultés des élèves

F6A ne mentionne pas de difficultés liées à la compréhension du concept scientifique d'énergie¹²², mais il évoque des difficultés liées à la compréhension du concept sociétal d'énergie, notamment concernant la polysémie du mot « énergie » dans la société – mais sans la mettre en lien avec le sens qui lui est donné en physique (F6A, 373-376).

Il relève des difficultés pour les élèves relatives à la compréhension du concept sociétal d'énergie (F6A, 377-379) qu'il illustre par un exemple :

« prenez la crise actuelle on dit voilà si le gaz russe est coupé vous n'aurez pas de chauffage cet hiver // alors qu'ils entendent que le gaz doit disparaître le charbon doit disparaître le pétrole aussi euh / au bénéfice de toutes ces énergies inépuisables ou renouvelables // ils sont en droit de se poser la question bah si on coupe le gaz russe // pourquoi / pourquoi est-ce qu'on aurait des soucis ? » (F6A, 379-383)

Cet exemple tend à montrer une difficulté liée à la compréhension des *enjeux sociétaux* plus qu'à la compréhension du *concept d'énergie*, ce que confirme le second exemple qu'il prend :

« il y a / le nucléaire / les pro nucléaire et les // et puis les anti nucléaire / je ne sais pas comment un élève de de collège enfin de quatrième troisième / arrive à s'en sortir avec toute / avec cette somme d'informations » (F6A, 383-385)

Connaissances sur les difficultés des enseignants

Selon F6A, les enseignants souhaitent « mettre à jour » leurs connaissances relatives à l'énergie en tant que « question sociétale » (F6A, 254-257), considérées comme lacunaires.

122 Par ailleurs, on peut remarquer que lorsque F6A évoque l'enseignement des forces au collège, il le juge facile (F6A, 284-285 : « ce n'est pas un concept compliqué / à expliquer ») et n'y associe aucune difficulté potentielle : « je ne comprends toujours pas pourquoi on n'a plus le droit de parler de force au collège / c'est quelque chose qui qui m'échappe complètement pourquoi est-ce que c'est disparu des programmes pédagogiques / alors que c'est voilà ça ne me paraît pas ce n'est pas un concept compliqué / à expliquer // et donc voilà c'est des choses que que que j'essaye de distiller / vis-à-vis de l'enseignement » (F6A, 282-286)

Selon F6A, les enseignants ont également besoin d'éclaircissements théoriques, de remise à niveau scientifique. Par exemple, ils méconnaissent les unités d'énergie hors système international, comme la calorie et la kilocalorie (F6A, 269-273) ; ils ne comprennent pas ce qu'est la fission nucléaire (F6A, 279-282).

F6A relève également que, bien que les enseignants connaissent la démarche scientifique dans ses grandes lignes, ils ne la maîtrisent pas réellement (F6A, 320-328).

Orientation pour l'enseignement des sciences

Pour F6A, les sciences doivent être enseignées dans une optique de formation de futurs scientifiques (F6A, 311-319). F6A évoque également les liens entre le lycée et l'université, qui doivent guider l'enseignement des sciences dans le secondaire (F6A, 303-304). Selon lui, l'enseignement des sciences doit se faire avec beaucoup de rigueur, et sans complexité inutile (F6A, 316-318).

Un modèle sociétal de l'énergie

En fin d'entretien, lorsque nous interrogeons F6A sur l'enseignement de l'énergie au collège, il évoque les interactions fondamentales, le travail des quatre forces fondamentales, auxquelles il associe une forme d'énergie et une source d'énergie (voir ci-avant). Il s'agit d'une vision mécaniste de l'énergie, qui ne prend pas en considération la chaleur. Le modèle auquel F6A fait référence ne peut pas strictement être qualifié de *scolaire* : il ne comporte pas d'éléments spécifiques à l'enseignement, qui puissent le distinguer d'un modèle scientifique.

Bien qu'il considère l'énergie comme l'« unité de transformation de la matière » (F6A, 208 ; 406), F6A n'évoque aucune propriété de l'énergie tout au long de notre entretien (aucune occurrence pour les familles lexicales des mots *conversion*, *conservation*, *transfert*, *puissance*, *dégradation*, *dissipation*).

Cependant, F6A évoque largement l'énergie en tant que concept sociétal. Par exemple, il utilise un vocabulaire consumériste, mentionnant à plusieurs reprises la consommation d'énergie (F6A, 229 ; 243 ; 249 ; 294), la production d'énergie (F6A, 211 ; 243) et la production d'électricité (F6A, 113 ; 122 ; 212 ; 243). Il ne considère pas que l'utilisation de ces expressions puisse poser problème dans l'enseignement (F6A, 237-250).

Les extraits ci-après illustrent l'ancrage *sociétal* donné au concept d'énergie par F6A, dans un contexte d'enseignement :

« l'autre chose qui me paraît importante pour eux c'est qu[e les élèves] aient vraiment une réelle objectivité par rapport // à voilà d'un point de vue sociétal et sur l'énergie / parce que tout le monde vient avec / avec ses opinions // voilà politiques ou autres / et // et ça je trouve que c'est des choses à / à bannir / même si tout le monde serait d'accord si on en parlait mais quand on rentre dans le détail et quand on écoute des discours / eh bien ce n'est pas toujours le cas / et qu'il y ait une vraie vue d'ensemble / des / des différents avantages et inconvénients de chaque moyen de production d'électricité ou de consommation d'énergie / de telle façon à avoir un voilà // une explication une vue d'ensemble et des réponses aux questions aux élèves / de façon objective // » (F6A, 288-296)

« il n’y a pas / une seule source d’énergie idéale magique et miraculeuse qui va répondre à tous les problèmes de la société au niveau mondial / mais (...) on doit forcément passer par un mix énergétique et ce mix énergétique doit s’adapter // aux endroits aux lieux à la politique aux ressources et cætera / donc et toujours on se soucie vis-à-vis de / bah de l’environnement » (F6A, 390-394)

13.5. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons analysé les pratiques déclarées relatives aux stages de formation F4, F5, et F6, proposés par des *Maisons pour la science*, adossées à la fondation *La main à la pâte*, qui promeut un enseignement des sciences basé sur l’expérimentation et une mise en relation entre le monde de l’enseignement et le monde professionnel scientifique. Ces formations s’adressent à des enseignants d’horizons divers (disciplines et niveaux d’enseignement).

Les trois formateurs interrogés ont une double formation, de scientifiques (dans le domaine de la physique) et de formateurs. Deux d’entre eux ont également une formation d’enseignant de primaire. Tous évoquent les contraintes institutionnelles qui influencent leurs pratiques, liées à la structure dont ils dépendent. Par ailleurs, ils mobilisent peu de connaissances professionnelles en lien avec l’enseignement et l’apprentissage de l’énergie qui soient conformes avec les résultats issus des recherches en didactique.

Malgré ces déterminants communs, les modèles scolaires de l’énergie auxquels les trois formateurs font référence sont très différents les uns des autres :

- F4A évoque plusieurs modèles scientifiques scolaires de l’énergie, proches les uns des autres, mais qui présentent des différences selon les disciplines scolaires (sciences physiques, technologie, SVT), notamment en terme de représentation par des chaînes énergétiques. Selon elle, l’énergie possède plusieurs formes et peut passer d’une forme à une autre ; elle n’évoque pas d’autres caractéristiques scientifiques scolaires de l’énergie. Elle parle également d’énergie sous un angle sociétal (non scientifique), comme objet de consommation.
- Le modèle scientifique scolaire de l’énergie proposé pendant la formation F5 est exclusivement basé sur la mécanique : il fait appel aux formes cinétique, potentielle et mécanique de l’énergie, aux transformations d’énergie et à la conservation de l’énergie. Ce modèle est présenté comme un initiateur d’un modèle plus large de l’énergie, qui n’est *a priori* pas abordé pendant la formation.
- Le modèle de l’énergie évoqué par F6A dans le cadre de la formation F6 est un modèle sociétal, mis en évidence par l’utilisation d’un vocabulaire consumériste, par l’évocation de problématiques sociétales liées à l’énergie, et par l’absence d’évocation de caractéristiques habituellement attribuées à l’énergie. F6A décrit brièvement un modèle scientifique de l’énergie qu’il juge pertinent pour l’apprentissage de ce concept en collège, bien qu’il ne comporte pas d’adaptations spécifiques pour l’enseignement secondaire.

F4A et F6A présentent l’énergie sous un angle sociétal, dans l’optique d’une mise en relation entre l’enseignement des sciences et le monde professionnel de l’industrie scientifique, en

cohérence avec les visites d'entreprises prévues dans le stage de formation (centrale électrique, site Total).

À l'inverse, F5A, qui propose une formation centrée sur une démarche d'investigation et sans mise en relation avec le monde professionnel scientifique, présente l'énergie sous un angle scientifique restreint au domaine de la mécanique.

Nous remarquons que F5A et F6A associent particulièrement le concept d'énergie au concept de force, F6A n'envisageant pas un enseignement de l'énergie qui ne prenne pas appui sur les interactions fondamentales.

14. L'énergie vue par les formateurs F2A, F2B, F2C et F2D – analyse de pratiques déclarées

Dans ce chapitre, nous allons nous intéresser au discours des formateurs qui ont animé le stage de formation F2 au cours de l'année scolaire 2021-2022. Nous mettrons en évidence qu'il évoquent plusieurs modèles scientifiques scolaires de l'énergie distincts.

Notre travail se base sur l'analyse des propos tenus par les formateurs : les pratiques et déterminants mis en évidence sont inférés par des déclarations et non par des comportements effectifs. Notre analyse met en évidence certaines incohérences, que nous avons relevées soit parce qu'elles permettent de répondre à nos questions de recherche, soit parce qu'elles mettent en évidence certaines difficultés que nous ont empêchée d'y répondre clairement.

14.1. Quels formateurs, quelle formation ?

Lorsque nous avons effectué nos entretiens, le stage de formation F2 avait déjà eu lieu à deux reprises : la première fois en présentiel, et la seconde en distanciel (année scolaire 2020-2021), du fait de la situation sanitaire (F2A, 55-58 ; F2B, 210-211). Selon F2C et F2D, après la première session, le stage n'a pas été retenu au PAF pendant un ou deux ans, avant d'être à nouveau proposé en 2020-2021 (F2C, 136-144 ; F2D, 90-91).

Dans cette section, nous commençons par décrire les quatre formateurs à travers leur expérience professionnelle, puis nous évoquons la genèse du stage de formation F2, qui se déroule sur deux journées complètes et dont nous donnons brièvement la structure.

Ce stage est présenté comme interdisciplinaire (F2C, 501) et a regroupé, dans sa première version, des enseignants de toutes disciplines (F2C, 494-500). Il a par la suite été restreint aux enseignants de physique-chimie, SVT et technologie de l'enseignement secondaire (F2C, 494-500).

Présentation des formateurs

F2A, F2B, F2C et D2D appartiennent au même groupe de recherche collaborative, que nous notons « GRC-F2 ».

F2A est ingénieur de formation, mais il n'a jamais exercé cette profession (F2A, 23-25). Suite à l'obtention du CAPES, il a travaillé pendant trois ans au Palais de la Découverte. Cette expérience professionnelle lui a permis d'apprendre « sur le tas » certaines compétences de formateur (F2A, 35-36). Il n'a pas, par ailleurs, suivi de formation de formateurs (F2A, 15-16). Il enseigne la physique-chimie dans le secondaire depuis 8 ou 9 ans (F2A, 37-40). Après avoir effectué son année de stage en lycée, il a exercé ses fonctions en collège (F2A, 44-47)¹²³. Depuis cinq ans, F2A enseigne exclusivement en classes de quatrième et de troisième (F2A, 40-42). Il anime quelques formations académiques, notamment avec F2C.

F2B a soutenu une thèse en physique théorique, dans le domaine de la nanoélectronique (F2B, 3-4), puis a effectué un post-doc à l'étranger (F2B, 8). Il n'a pas voulu continuer dans la recherche parce qu'il n'avait pas envie de rester cantonné à un sous-domaine de la physique (F2B, 14-29), et a

123 Il a également enseigné en terminale ST2S en début de carrière.

voulu se réorienter vers un métier lui permettant de travailler avec des enfants (F2B, 36-38), hésitant entre éducateur spécialisé, comédien, chanteur ou enseignant (F2B, 46-51). Après avoir enseigné et suivi une école de théâtre à mi-temps pendant trois ans (F2B, 58-59), il a obtenu le CAPES, puis l'agrégation au début des années 2010 (F2B, 88). Il a toujours enseigné à la fois en collège et en lycée (F2B, 162-170). Son parcours professionnel a été marqué par l'immobilisme qu'il a perçu chez la plupart de ses collègues enseignants (toutes disciplines confondues) : il a construit sa pratique en opposition à cet immobilisme (F2B, 64-75). F2B s'est intéressé en particulier à l'évaluation par compétences (F2B, 99-108 ; 182-193) et aux « pratiques innovantes », ce qui, suite à une inspection, lui a permis de devenir tuteur (en 2012) puis formateur (en 2015) (F2B, 110-117). Il a suivi une formation de formateurs, autre que le CAFFA¹²⁴, sans la finaliser (F2B, 129-142). Actuellement, F2B est en disponibilité pour terminer la rédaction de son mémoire de formateur et écrire un livre sur l'évaluation (F2B, 199-204).

F2C a suivi un parcours scientifique : bac scientifique, DEUG, licence, maîtrise, DEA en physique généraliste (F2C, 3-10), thèse en interface physique-biologie (F2C, 11-12). Il a été moniteur en mesures physiques pendant sa thèse (F2C, 12-13), ce qui lui a donné envie de devenir enseignant plutôt que chercheur (F2C, 15-18 ; 20-23). Il a alors obtenu l'agrégation de physique, puis suivi un master de didactique (F2C, 22-25). Il a enseigné à des étudiants en restauration d'art (F2C, 31-32), puis exclusivement en lycée pendant une dizaine d'années (F2C, 33-42). F2C a exercé les fonctions de formateur académique, puis a passé le CAFFA l'année de sa création (F3C, 53-74). Il est inspecteur académique depuis septembre 2020 (F2C, 42-43). Au cours de son parcours, il a donné beaucoup de formations à destination d'enseignants, de tuteurs et d'enseignants néotitulaires (F2C, 77-82).

F2D a suivi un parcours scientifique avec une orientation en didactique des sciences : bac scientifique, licence, maîtrise, master de didactique, thèse, post-doc (F2D, 50-51). Elle a obtenu le CAPES en 2002 (F2D, 57), puis a enseigné dans le secondaire pendant 6 mois (F2D, 58-59). F2D a été nommée maîtresse de conférences en 2009 (F2D, 3). Depuis lors, elle a donné des cours de sciences, en particulier en thermodynamique (F2D, 9-11), ainsi que des cours de formation initiale en master MEEF 1 et 2, autour de la modélisation (F2D, 12-15). F2D s'est beaucoup formée au contact de ses collègues, notamment aux visites en établissement (F2D, 24-29). Elle a assisté à quelques cours de formation de formateurs (F2D, 31-33). Elle se forme en ce moment à « l'école inclusive » (F2D, 38) et aux « pratiques innovantes » (F2D, 40-41) ; elle a également suivi un master d'« administrateur des institutions de recherches et de la culture scientifique » l'année de sa nomination en tant que maîtresse de conférences (F2D, 62).

Genèse de la formation

Constitution du GRC-F2

Il y a une dizaine d'année, F2C a participé à la constitution du GRC-F2, dans le cadre du master de didactique des disciplines qu'il a suivi (F2C, 44-48 ; 89-104). À l'origine, il s'agissait d'un groupe de travail et de discussions en lien avec les changements de programmes du lycée (F2C, 46-48), qui regroupait des enseignants-chercheurs et des étudiants de master de didactique des sciences

124 Certificat d'Aptitude aux Fonctions de Formateur Académique

(F2D, 100-105). F2C est alors co-responsable de ce groupe (F2C, 117), que F2D rejoindra deux ou trois ans après (F2C, 83-86), et qu'ils mènent ensemble à présent (F2C, 120-121)¹²⁵.

F2D a présenté le GRC-F2 à des enseignants de physique-chimie lors d'une conférence de l'UdPPC (F2C, 122-123 ; F2D, 107-110), à la suite de laquelle F2A a rejoint le groupe (F2C, 123-124).

F2B a rejoint le GRC-F2 par l'intermédiaire d'une collègue qui y était auparavant, et qui n'en fait plus partie depuis plusieurs années (F2B, 237-246).

Lors de la formation 2020-2021, les membres du GRC-F2 sont les quatre formateurs¹²⁶ (F2C, 109-111).

Choix du thème de l'énergie

Pendant les entretiens, F2A et F2C ont déclaré ne pas avoir choisi l'énergie comme axe de travail du GRC-F2, précisant qu'initialement, ce thème ne leur plaisait pas (F2A, 75-86 ; 111-118 ; F2C, 520-525).

À l'inverse, F2B et F2D présentent la focalisation des travaux du GRC-F2 sur l'énergie comme un choix de groupe, motivé par un changement de programmes de collège et par une volonté collective de travailler sur ce thème (F2B, 218-225 ; 234-236 ; F2D, 112-131 ; 134-140).

Mise en place de la formation

Selon F2B, c'est naturellement et collectivement qu'est venue l'idée de proposer une formation académique relative à l'énergie (F2B, 228-232 ; 257-263).

À l'inverse, F2D présente cela comme une demande à caractère institutionnel, formulée par le responsable du réseau auquel appartient le GRC-F2 (F2D, 144-154). Cette version est corroborée par une remarque de F2A, lorsqu'il décrit le premier stage de formation animé par le GRC-F2 (F2A, 61-62).

Structure de la formation

Le stage qui a eu lieu en 2020-2021 a une structure similaire à celui qui est prévu pour l'année 2021-2022 (F2B, 655-667 ; F2C, 180-183 ; 397-399 ; 410 ; F2D, 183-187 ; 190-199)¹²⁷ :

- matinée de la première journée :
 - activité sur le langage qui met en jeu des extraits de bandes dessinées, avec comme objectif de montrer que le langage du quotidien est « raffiné » et a un sens proche de celui de la physique (F2A, 4545-461) ;

125 Cependant, F2D déclare qu'elle fait partie du groupe de personnes qui a créé le GRC-F2 (F2D, 100-106), et que c'est elle qui anime à présent ce groupe, seule (F2D, 93-97).

126 F2A a quitté le groupe en 2021-2022, mais a contribué activement à la formation de l'année précédente, sur laquelle est calquée la formation proposée en 2021-2022 : « on ne va pas la modifier parce que // voilà une formation il faut // enfin il faut la concevoir pour / pour ce qu'elle est elle-même / des gens en présence en même temps et tout ça / par contre / elle ne va pas tellement changer // là on a discuté de sa structure voilà on trouvait qu'elle est bien enfin / elle est solide » (F2C, 180-183)

127 Nous avons assisté au stage qui a eu lieu en 2020-2021, que nous décrivons ici brièvement (pour une présentation approfondie, se référer au chapitre suivant).

- présentation de quatre expériences en lien avec la chaleur et avec l'électricité : analyse énergétique des situations en groupes.
- après-midi de la première journée :
 - introduction du « modèle » et des chaînes énergétiques (F2B, 656-659 ; F2C, 406-407) ;
 - présentation et utilisation d'une carte conceptuelle qui reprend les mots de la vie quotidienne et scientifiques associés au concept d'énergie ;
 - conservation de l'énergie et chaînes énergétiques (exercices quantitatifs).
- matinée de la seconde journée :
 - définition du « convertisseur d'énergie » ;
 - présentation de quelques expériences et exploitation quantitative du « modèle » (F2C, 407-408).
- après-midi de la seconde journée : ateliers d'élaboration de progressions ou d'activités (version 2020-2021) / ateliers de production de ressources (version 2021-2022) (F2C, 183-190 ; F2B, 667).

14.2.Déterminants potentiels de l'activité des formateurs inférés par analyse des entretiens

Dans cette section, nous abordons les déterminants potentiels de l'activité des formateurs qui peuvent expliquer leurs choix de contenu de formation et d'enseignement liés à l'énergie, en les catégorisant selon la méthodologie prévue.

Déterminants de nature sociale – liés au collectif

Nous considérons les déterminants liés au collectif comme étant de nature sociale, bien qu'ils soient également liés à des rapports hiérarchiques au sein du collectif et à des contraintes qui peuvent être vécues comme institutionnelles (par exemple : le manque de temps pour la préparation de la formation peut être considéré comme une contrainte sociale, parce que le collectif a décidé d'animer le stage dans des délais courts, mais aussi comme une contrainte institutionnelle, parce que le responsable institutionnel du GRC-F2 l'a demandé).

Dans la section précédente, nous avons montré une certaine opacité concernant les raisons qui ont mené au choix du thème de l'énergie, vécu comme une contrainte sociale pour deux des quatre formateurs et comme un choix collectif pour les deux autres. De la même manière, la façon dont les formateurs se sont répartis la préparation et l'animation des différentes parties de la formation n'a pas pu être clairement déterminée.

F2A a largement contribué à la préparation du stage de formation, pour lequel il a proposé un grand nombre d'éléments (F2A, 129-132 ; 290-294) ; il n'a cependant pas été au cœur du processus de décision du contenu de la formation (F2A, 403-410) et aurait aimé animer davantage de parties de ce stage (F2A, 63-66 ; 431-433).

Pour F2B, F2C et F2D, la répartition des tâches de préparation du stage au sein du groupe s'est faite selon les envies ou les disponibilités, tout comme l'animation des différentes parties du stage (F2B, 673-674 ; 682-688 ; F2C, 416-419 ; F2D, 203-225).

Déterminants liés aux contraintes de temps

F2A et F2B ont évoqué des contraintes de temps fortes pour la préparation du stage de formation. Ils évoquent un travail dans l'urgence, sous la pression du temps (F2A, 66-69 ; 495-501 ; 503-509 ; 668-674 ; 742-744).

À l'inverse, F2C et F2D n'ont pas évoqué de contraintes de temps pendant les entretiens. Selon F2C, le stage de formation est globalement prêt, et sa mise en place (un mois après notre entretien) ne demandera pas de travail particulier (F2C, 180-190).

Déterminants de nature institutionnelle

Selon F2C, inspecteur académique, il existe une forte demande institutionnelle de promouvoir des stages de formation *scientifiques* :

« les inspections elles sont en demande de / de stage / je sais parce que moi je suis sur le dossier de la formation continue / il y a un vrai enjeu à ce que les enseignants de physique chimie // on est / on soit sur / sur // de la formation didactique voire de la consolidation scientifique // en même temps ce n'est pas si différent parce que la didactique c'est de la belle science hein / donc quand on fait // quand on / dans la didactique on se consolide beaucoup scientifiquement » (F2C, 146-151)

Lors des entretiens, les formateurs ne mentionnent pas d'autres contraintes extérieures institutionnelles.

Nous supposons que la présence d'un inspecteur académique et d'une chercheuse en didactique – formatrice en INSPÉ – parmi eux donne une couleur institutionnelle particulière à cette formation.

Connaissances professionnelles

Pendant les entretiens, nous avons posé aux formateurs des questions visant à les faire exprimer certaines de leurs connaissances professionnelles en lien avec l'enseignement et l'apprentissage de l'énergie (difficultés des élèves spécifiques à ce thème, nature des besoins de formation chez les enseignants, stratégies d'enseignement de l'énergie, etc.) Nous avons constaté que F2C, F2D et, dans une moindre mesure, F2B avaient besoin de temps de réflexion pour répondre à ces questions, qu'ils ont parfois précisé ne s'être jamais posées (F2B, 598-603 ; F2C, 423-428 ; 446-454 ; F2D, 227-236)

Connaissances professionnelles institutionnelles

F2A et F2B relèvent l'existence de plusieurs chaînes énergétiques différentes dans les manuels scolaires, que F2A trouve incohérentes et sources d'erreurs (F2B, 358-560 ; F2A, 95-97).

F2B pointe également des incohérences dans les programmes :

« ce thème de réflexion il vient en fait de l'incohérence qu'on a trouvée dans les programmes / et de la nécessité en fait de clarifier un certain nombre de trucs // entre langage courant langage / langage scientifique // il y avait besoin de de / de mettre au clair un certain nombre de trucs dans les programmes // voilà / d'autant que ça a été plutôt // validé par l'inspection / de physique » (F2B, 218-222)

Il remarque que les auteurs du programme considèrent l'énergie comme un thème non transversal et l'associent en particulier à l'électricité (F2B, 330-339).

Selon F2D, il existe un manque de résultats en didactique¹²⁸ au sujet de l'enseignement de l'énergie :

« quand [les enseignants] enseignent l'énergie aux élèves // ils manquent de billes en fait c'est vraiment un vrai chantier // **la didactique de ça // elle n'est pas // ce n'est pas très évolué** et // alors / on a toujours des formules comme ça mais pour donner du sens à ça et typiquement l'énergie électrique / ce n'est pas / ce n'est pas évident » (F2D, 366-370)

tandis que, selon F2C, la question de l'énergie a déjà été largement traitée en didactique :

« alors moi [l'énergie] ça ne m'emballait pas // à la base / parce que je trouvais que c'était un / un concept que moi j'ai du mal à cerner / qui me / voilà ça me / je trouvais qu'avec tout ce qui existait // déjà / en didactique // moi je n'étais pas emballé » (F2C, 250-522)

Cependant, ni F2D, ni F2C n'évoquent le contenu des résultats issus de la recherche en didactique relatifs à la compréhension, à l'enseignement et à l'apprentissage de l'énergie.

Connaissances sur les stratégies d'enseignement en physique

Au cours des entretiens, les formateurs ont évoqué plusieurs stratégies d'enseignement de la physique, parfois spécifiques à l'énergie et, le plus souvent, généralistes.

Généralités

F2A a évoqué un grand nombre d'expériences et de manipulations, en lien avec les différents domaines de la physique et de la chimie. Son enseignement de l'énergie présente un ancrage fort dans l'expérimentation, et nous considérons qu'il s'agit d'une stratégie d'enseignement des sciences qu'il met en œuvre et qu'il promeut à travers le stage de formation.

Par ailleurs, F2C évoque l'importance de l'utilisation de schémas dans l'enseignement de la physique. Il les qualifie de « belle modélisation » (F3C, 435).

Enfin, pour F2B, l'enseignement de l'énergie doit se faire à travers l'utilisation de chaînes énergétiques, qu'il identifie au modèle de l'énergie qu'il enseigne et dont il propose une méthodologie de représentation (voir §14.3). À l'inverse, F2A considère que l'utilisation de ce type de chaînes énergétiques est un frein pour les apprentissages (nous y reviendrons par la suite).

Partir du qualitatif pour aller vers le quantitatif

F2A et F2C soulignent que l'enseignement et l'apprentissage des sciences (de l'énergie, pour F2A) se fait de façon progressive, en allant du qualitatif vers le quantitatif (F2C, 428-433 ; F2A, 391-398).

¹²⁸ Bien que ce ne soit pas une connaissance professionnelle *institutionnelle* au sens strict, il nous a paru cohérent de la présenter dans ce paragraphe

Enseigner l'énergie tout au long de la scolarité, dans tous les domaines de la physique-chimie

Tout au long de notre entretien, F2A décrit sa manière d'enseigner l'énergie soit directement, soit en présentant des expériences qu'il a élaborées, dans un très grand nombre de domaines de la physique et de la chimie. Il s'agit, par exemple, d'utiliser un circuit hydraulique pour expliquer l'électrocinétique (F2A, 162-206), de comparer le pouvoir calorifique de différents combustibles (F2A, 538-560), de décrire la photosynthèse (F2A, 520-528). Les exemples qu'il utilise sont choisis pour illustrer les différentes propriétés de l'énergie (puissance – de chauffe ou électrique –, énergie électrique, chaleur, puis énergie en mécanique).

De la même manière, F2B propose un enseignement de l'énergie transversal, tout au long de l'année, à l'encontre des directives institutionnelles véhiculées par les programmes (F2B, 330-339 ; 223-226).

Un appui fort sur le vocabulaire courant

La première activité proposée pendant le stage est liée au vocabulaire de la vie quotidienne. L'ensemble des formateurs accordent une importance particulière à la prise en compte du vocabulaire courant, et proposent un enseignement de l'énergie en appui sur les mots du quotidien (F2B, 624-628 ; 760-770 ; F2C, 457-464).

F2A n'évoque pas la polysémie des mots de la physique comme *énergie*, *chaleur* ou *force* ; il présente le langage « naturel » comme très proche de celui de la physique :

« ce que je préfère à la limite dans ce que j'avais prévu de faire même si je n'ai pas / fait comme je voulais c'était // c'est que **les mots ils ont du sens et que ces mots ce n'est pas des mots // déconnectés / décrochés // du langage courant et // qui est déjà un langage raffiné** // et que // la puissance de chauffe tout le monde sait ce que c'est par exemple // moi je parle des réchauds enfin ce n'est pas simple ma réponse ce n'est pas / ce n'est pas en une phrase mais / que / **on devrait s'appuyer sur des / sur des situations concrètes / du langage courant // pour / introduire les notions // voilà d'énergie de puissance de chaleur** » (F2A, 284-390 ; voir aussi 443-453 ; 465-469 ; 702-714 ; 728-749)

Pour F2C, le vocabulaire de la vie courante doit être clarifié en regard du vocabulaire scientifique :

« il y a une dimension langagière aussi qui est / qui est importante // pour distinguer // tout ça après ça donne des clefs pour // pour mieux analyser un peu le langage quotidien associé à l'énergie // l'énergie propre l'énergie sale // les pertes d'énergie // les productions d'énergie bon // voilà // tout ça scientifiquement sont des abus de langage / après en même temps quand on a compris ce n'est pas grave / mais // mais chez les élèves c'est / c'est source de / de difficultés » (F2C, 235-240 ; voir aussi 464-474)

Bien que tous les formateurs promeuvent un enseignement de l'énergie qui prend appui sur le langage courant, nous voyons que l'appui recherché n'est pas le même selon le formateur. En particulier, F2A pointe une continuité entre ces deux langages, tandis que F2C évoque les différences de sens données au même mot dans ces deux langages (nous verrons par la suite qu'il considère cela comme une difficulté majeure à laquelle les élèves sont confrontés).

Connaissances sur les stratégies de formation

Nous n'avons pas identifié de stratégies de formation dans le discours des formateurs.

Nous relevons cependant deux éléments qui peuvent être reliés à des stratégies de formation :

- une stratégie de formation par homologie (plusieurs activités présentées aux enseignants-stagiaires sont *a priori* utilisables en l'état en classe) ;
- la nécessité de proposer une formation dans laquelle les enseignants sont invités à faire des expérimentations¹²⁹ (F2A, 58-62).

Connaissances sur les difficultés des élèves

Nous avons identifié des connaissances sur les difficultés des élèves autour de trois axes : le vocabulaire, certaines caractéristiques de l'énergie et les chaînes énergétiques.

Difficultés générales liées au vocabulaire

Selon F2A, les enseignants ont l'habitude d'utiliser un « jargon » inaudible par les élèves. Ayant été confronté à cela lorsqu'il était élève, il considère l'utilisation de ce vocabulaire spécifique comme une difficulté majeure pour les élèves (F2A, 25-29).

Par ailleurs, F2B et F2C évoquent la difficulté de « s'affranchir du vocabulaire courant // pour arriver à formuler les choses en langage scientifique » (F2B, 803-804) (voir aussi F2C, 235-240).

Difficultés liées au sens donné à la chaleur

Pour F2B, l'utilisation du mot *chaleur* constitue une difficulté pour les élèves, qui a été levée par son remplacement dans l'enseignement par l'expression « transfert thermique » :

« le mot chaleur n'est pas très structurant dans la tête des élèves parce qu'en fait il est trop relié au ressenti // et // et le mot transfert thermique // il vient tout de suite // tout de suite en // en confusion avec le mot énergie thermique » (F2B, 586-588)

Cependant, F2A et F2C utilisent exclusivement le mot *chaleur* (aucune occurrence pour l'expression « transfert thermique » contre respectivement 2 et 21 pour « chaleur » pendant nos entretiens) (nous rappelons que F2A considère que les mots de la physique ont un sens proche de et compatible avec celui qu'ils prennent dans le langage courant).

Difficultés liées au sens donné aux conversions d'énergie

Pour F2B, le mot *conversion* peut désigner à la fois un changement de forme d'énergie au sein d'un système, un changement de mode de transfert de l'énergie, ou un changement de forme d'énergie en mode de transfert (et inversement). Il s'agit, selon lui, du sens que prend le mot *conversion* en physique. Cette polysémie a pour conséquence une confusion chez les élèves, qu'il propose de lever en n'utilisant pas le terme de *conversion* – ni celui de *convertisseur*, qu'il juge *non structurant* (F2B, 442-464).

Aucun autre formateur n'a évoqué ce type de difficultés.

¹²⁹ En 2020-2021, F2A était peu à l'aise avec l'idée de faire une formation en distanciel, parce que cela ne permettrait pas aux enseignants-stagiaires de découvrir concrètement les manipulations qu'il souhaitait leur présenter.

Difficultés liées au sens donné à l'énergie électrique

Selon F2B, les élèves associent énergie et électricité :

« il y en a qui ont fait des trucs hein / sur l'énergie // et // c'est là que tu t'aperçois qu'en fait / l'énergie / est complètement collée à l'électricité // parce qu'en fait / ce qui a été fait par mes / par les élèves avec mes collègues de cinquième / c'est que / c'était fait avec l'électricité // et donc ils ont / ils ont cette conception // que c'est / enfin que les deux sont liés quoi » (F2B, 789-793)

Ils identifient l'électricité à une forme d'énergie, ce que F2B considère comme une erreur :

« des énergies qui ne sont pas claires comme énergie électrique qui est en fait un transfert / que du coup on va mettre sur une flèche mais du coup (...) sur les flèches / et donc on va avoir un mélange entre // sur les flèches entre les formes d'énergie et les transferts » (F2B, 461-464)

Cependant, F2A utilise fréquemment l'expression « énergie électrique » (14 occurrences pendant l'entretien), dont il aurait voulu faire un thème de formation pendant le stage (F2A, 130-132 ; 351-354). Il la présente en décrivant un transfert d'énergie induisant une modification de l'énergie électrique de « paquets de charges »¹³⁰ :

« je présente l'énergie électrique c'est que / à chaque fois qu'il y a un paquet de charges je parle de paquets de charges / à chaque fois qu'il y a un paquet de charges qui chute d'un volt eh bien il y a un joule qui a été / fourni // et donc s'il y a deux paquets de charges ça fera deux joules » (F2A, 220-223)

Difficultés en rapport avec les chaînes énergétiques

F2A expose plusieurs difficultés liées à l'utilisation des chaînes énergétiques en physique-chimie :

- le fait que les chaînes proposées en physique-chimie et en technologie soient différentes les unes des autres (F2A, 119-123) ;

- le fait que les chaînes énergétiques comportent le plus souvent un trop grand nombre d'éléments (F2A, 419-421) ;

- le fait que ces chaînes ne sont pas une image calquée sur la réalité – par exemple, elles ne reprennent pas la structure d'un circuit électrique et ne décrivent pas la nature des réactifs et des produits mis en jeu lors d'une combustion :

« dans un circuit électrique on va / il y a un fil qui va jusqu'à la lampe et il y a un fil qui repart de la lampe jusqu'à la pile par exemple // donc là il y a deux choses / enfin il y a / il y a un fil qui fait arriver quelque chose / on traduit ça par une flèche / tout de suite c'est compliqué // mais en fait c'est vrai pour n'importe quoi hein je me rends compte que l'énergie chimique c'est pareil // on a des réactifs et puis ce qui ressort c'est des / c'est des produits donc on a // on a souvent ça // la flèche entrante dans ce diagramme-là elle correspond à quelque chose d'assez ponctuel // et // pareil pour la flèche sortante /

¹³⁰ Pour F2B, les systèmes pris en compte dans le modèle énergétique ne peuvent être que macroscopiques : l'énergie électrique telle que définie par F2A n'a donc, pour lui, pas de sens.

de toute façon / on représente par une seule flèche sortante // oh la la » (F2A, 142-149 ; voir aussi 298-304)

Ici, F2B évoque une spécificité des chaînes énergétiques, représentations d'un modèle structurel formel, ni mécaniste, ni symbolique (voir §1.3).

Les autres formateurs n'évoquent aucune difficulté en lien avec la construction, la lecture ou l'utilisation des chaînes énergétiques.

Difficultés liées au concept de puissance

F2A évoque des confusions entre énergie et puissance chez les élèves (F2A, 93-94). Il souligne que la puissance n'a pas une unité de « vitesse », ce qui engendre des difficultés dans sa conceptualisation en tant que *débit d'énergie* :

« au bout d'un moment ils commencent à sentir que la puissance ça a rapport avec cette vitesse à laquelle on fournit de l'énergie / pour moi la puissance c'est ça qui est difficile et pour moi la difficulté là-dedans c'est les watts // parce que les watts on ne voit pas que c'est une vitesse » (F2A, 616-619)

Connaissances sur les difficultés des enseignants

Les formateurs s'accordent à dire que l'énergie est un thème difficile à enseigner, mais rencontrent des difficultés à déterminer les raisons qui expliquent cela (F2A, 90-91 ; F2C, 202-203 ; F2D, 168-172).

F2A souligne que c'est un concept partagé entre plusieurs disciplines, ce qui le rend difficile à enseigner (F2A, 103-107).

Il expose également des difficultés liées au fait que l'énergie est un concept abstrait et que les manuels ne le présentent pas de façon rigoureuse et cohérente (F2A, 88-101).

Lorsque F2B évoque les objectifs de formation, il souligne un manque de formalisme pour les chaînes énergétiques et une confusion entre transferts et formes d'énergie dans les manuels ; nous en déduisons que, selon lui, ce sont des sources de difficulté pour les enseignants :

« quand on veut mener l'analyse énergétique d'une situation // eh bien traditionnellement / tu as // des fois tu as des ronds des fois tu as des rectangles des losanges ça part un peu dans tous les sens // l'idée de convertisseur est extrêmement présente // et puis souvent il y a de la confusion aussi // sur // la question des transferts // et puis des // et des formes d'énergie » (F2B, 219-222)

De la même manière, F2D évoque des confusions entre transferts, formes et sources d'énergie :

« souvent ce qui revenait [dans les attentes des enseignants-stagiaires] / c'est // d'avoir des billes pour faire avec mes élèves / ce thème qui est compliqué // je sens que je suis un peu noyé dans / les différents mots-clefs / formes / sources / transferts // conservation // qu'est-ce qui est // on va dire principal à faire passer / qu'est-ce qu'il n'y a pas besoin / enfin des choses // ils avaient besoin d'éléments pour leurs pratiques de classe » (F2D, 168-172)

Buts et valeurs de la formation

Au cours des entretiens, F2B et F2C évoquent les raisons pour lesquelles ils proposent des formations et les objectifs de ces formations (F2B, 265-277 ; 277-282 ; F2C, 155-177 ; 381-384).

Tous deux partent du constat que les stages de formation ne sont suivis que par une très petite minorité d'enseignants. De ce fait, l'objectif de formation des enseignants n'est pas au cœur de leur proposition de stage de formation. Ils souhaitent que ce stage permette la création de ressources pour l'enseignement, soit directement, par une activité de création de ressources mise en place en fin de stage, soit par l'élaboration d'un fascicule sur l'enseignement de l'énergie, que le groupe compose grâce au retour réflexif des enseignants-stagiaires sur leurs propositions initiales.

Conclusion de section

Nous n'avons pas pu déterminer de façon certaine les contraintes qui ont pesé sur le collectif, notamment en ce qui concerne les contraintes sociales et temporelles liées à la construction du stage de formation et à la validation de son contenu.

Cependant, nous avons mis en évidence un fort ancrage de ce stage autour du vocabulaire – tant quotidien que scientifique. La question du vocabulaire apparaît transversale dans notre analyse : les connaissances professionnelles relevées en parlent largement, en la liant à la fois à des difficultés potentielles et à une stratégie d'enseignement de l'énergie. F2B et F2C jugent nécessaire de clarifier le vocabulaire scientifique, non consensuel dans l'enseignement. Or, nous avons mis en évidence de nettes différences de sens pour certains mots et expressions, comme *chaleur*, *conversions* et *énergie électrique*, au sein de l'équipe de formation.

Le stage de formation proposé ne répond pas à des stratégies de formation particulières, mais est ancré dans la problématique du vocabulaire et propose des activités *a priori* directement utilisables en classe par les enseignants-stagiaires. Selon deux des quatre formateurs, l'objectif principal de cette formation est la création de ressources, par les enseignants-stagiaires et / ou les formateurs.

14.3. Modèles scientifiques scolaires de l'énergie présentés par les formateurs

Nous n'avons pas pu caractériser de modèle scientifique scolaire de l'énergie unique et consensuel proposé par l'équipe de formateurs. Dans cette section, nous mettons en évidence la coexistence de deux modèles, portés pour l'un par F2A, pour l'autre par F2B et F2C (bien qu'il existe certaines différences dans les modèles mobilisés par ces deux formateurs).

L'énergie vue par les formateurs

Nous commençons par exposer la manière dont F2A, F2B, F2C et F2D entendent et présentent le concept d'énergie.

L'énergie : un mot scientifique et d'usage courant selon F2A

Pendant notre entretien, F2A a, à de nombreuses reprises, explicité les liens entre le vocabulaire de la vie de tous les jours et le vocabulaire scientifique (voir section précédente). Selon F2A, les

mots du quotidien ont un sens précis, extrêmement proche de celui qu'ils prennent en physique. C'est ainsi qu'il présente et définit l'énergie dans un contexte scolaire (F2A, 702-714).

D'un point de vue plus scientifique, il relie l'énergie à la notion d'action, sous un angle anthropocentré :

« [en dehors d'un contexte scolaire] je dirais de manière pratique hein c'est / c'est // peut-être purement utilitaire une vision ingénieure un peu c'est / c'est ce côté j'ai envie / j'ai quelque chose à faire de difficile qu'est-ce que / comment je vais réussir à // à produire une action // on quantifie un peu la difficulté à // à produire une action enfin / et // et donc on aurait besoin de convertisseurs qui // on va utiliser une autre forme d'énergie pour // pour arriver à l'action souhaitée / je ne sais pas arriver à une certaine température / dans un four arriver à une certaine luminosité d'une lampe arriver à une certaine / à élever un appareil / à élever un objet à une certaine / ou à propulser un objet c'est ce côté // voilà on essaye de quantifier ce qu'il va falloir pour exercer une action » (F2A, 717-724)

L'énergie : un concept défini par ses caractéristiques selon F2B et F2C

La question de la définition de l'énergie s'est posée au sein du GRC-F2 au cours de la période pendant laquelle nous avons effectué nos entretiens (F2C, 535-544). De ce fait, F2B et F2C – que nous avons interrogés en dernier – proposent une définition similaire de l'énergie, qu'ils présentent comme scientifique. Il s'agit de définir l'énergie par ses caractéristiques, en précisant que ce n'est pas une grandeur qui peut se mesurer directement :

« c'est une définition / plus (+) fonctionnelle / que // c'est pas défini en tant que tel enfin on ne dit pas tiens c'est quoi l'énergie / on parle plus (+) de ses propriétés / que de ce qu'elle serait fondamentalement maintenant / qu'est-ce que la masse ce n'est pas non plus // on ne définit pas une grandeur fond enfin pour ce qu'elle est mais / ses propriétés » (F2C, 584-587)

« grandeur / qui prend des formes différentes / qui se conserve / qui permette de faire du lien entre grandeurs et phénomènes // et qui ne se mesure pas directement / mais que // mais qui se détermine grâce aux mesures d'autres / grâce aux grandeurs qu'elle relie » (F2C, 578-581)

« c'est une / métagrاندeur / qu'on peut obtenir / dont on peut obtenir la valeur à partir du calcul et de la mesure de grandeurs mesurables // dans tous les domaines de la physique (silence 5 secondes) que (silence 10 secondes) ouais et puis après je dirais ce qu'elle me permet de faire / en fait elle me permet de // de relier qualitativement et quantitativement les phénomènes physiques / de / de divers domaines // de diverses grandeurs qui ne sont pas // facilement mettables en relation sauf par l'énergie // je ne sais pas moi // je ne sais pas // cette caractéristique qu'elle se conserve // après // on pourrait réfléchir à cette question qu'elle porte en elle la potentialité d'un changement // ceci dit ça me pose un problème avec l'énergie cinétique // avec la dichotomie potentielle cinétique // il faudrait y reréfléchir un peu plus » (F2B, 843-851)

L'énergie : un concept peu pertinent au collège selon F2D

F2D ne considère pas l'énergie comme un concept scientifique pertinent pour le collège (F2D, 237-239 ; 263 ; 269-285 ; 287-292).

Au cours de l'entretien, F2D a évoqué certaines caractéristiques de l'énergie : sources, transferts, formes et conservation de l'énergie (F2D, 241-243 ; 245-246 ; 260-261). Cependant, elle n'a défini aucun de ces termes et n'a pas donné d'exemple qui illustre ses propos. De ce fait, nous ne disposons pas d'assez d'éléments qui nous permettent de caractériser un éventuel modèle scientifique scolaire de l'énergie mobilisé par F2D.

L'énergie, un concept sociétal ?

Si l'ensemble des formateurs s'accordent à donner une grande importance au vocabulaire de la vie courante dans l'enseignement de l'énergie (voir ci-avant), ils ne mentionnent pas les enjeux sociétaux liés à l'énergie. Seul F2C les évoque, brièvement, lorsque nous lui demandons ce qu'un élève de fin de Cycle 4 doit retenir de ses enseignements relatifs à l'énergie :

« dans sa dimension // oui dans sa dimension / un peu citoyenne formation du citoyen // (...) je dirais un petit peu de recul et d'esprit critique sur / sur ce qui est dit autour de l'énergie // hein // l'idée de // l'idée de ressources // (...) en fait tout le vocabulaire quotidien associé à l'énergie (...) avoir un petit peu de / de recul sur le fait que / pour pouvoir le relier à des éléments / de sciences (...) ça permet de c'est un terme qui est tellement présent // l'appréhender à l'école ça permet de // de lui donner plus de sens et donc de donner plus de sens au / au monde qui nous entoure et puis aux enjeux de // du monde actuel quoi // voilà peut-être / bien former à l'énergie c'est / ça peut être quand même // bien former le citoyen / le citoyen // qu'on tente d'éclairer » (F2C, 483-493)

Le concept scientifique scolaire d'énergie proposé par les formateurs ne comporte pas, *a priori*, de dimension sociétale forte.

Modèle scientifique scolaire de l'énergie de F2B et F2C

F2B propose un modèle de l'énergie assimilé à un certain type de chaînes énergétiques, et indissociable de ces chaînes :

« **le modèle des chaînes d'énergie** c'est un modèle macroscopique » (F2B, 341-342 ; voir aussi 386-388)

Il précise que le modèle qu'il utilise et propose en formation (appelé « système stock transfert ») est en cours d'élaboration. F2B estime qu'il ne permet pas de représenter des « situations un peu complexes » – les limites du modèle actuel ne semblent pas clairement définies (F2B, 360-363).

De la même manière, F2C évoque le modèle « système stock transfert » en l'associant à une représentation graphique, qu'il appelle également « système stock transfert » (une seule occurrence pour « chaîne »¹³¹). Au cours de notre entretien, il mentionne une volonté de faire évoluer ce modèle, de telle sorte qu'il prenne en considération la dissipation de l'énergie (nous y reviendrons par la suite).

131 Aucune occurrence pour « diagramme » ou pour tout autre mot pouvant, selon nous, désigner une chaîne énergétique.

F2B évoque un modèle macroscopique, qui ne prend en considération que des systèmes macroscopiques (F2B, 385-395). Pour F2C, le modèle n'est pas particulièrement macroscopique ; il peut être utilisé pour décrire une même situation à plusieurs échelles (F2C, 440-446).

Nous décrivons ci-après les caractéristiques de l'énergie prises en considération dans ce modèle, la nature des chaînes associées ainsi que leur utilisation dans un contexte de classe au Cycle 4.

Un concept unificateur et transversal

Lorsqu'on leur demande de la définir, F2B et F2C présentent l'énergie comme un concept unificateur. F2C n'évoque pas cette propriété par ailleurs, à l'inverse de F2B, pour qui elle est fondamentale (F2B, 853-858).

Comme dit précédemment, F2B regrette que les programmes ne présentent pas cette grandeur comme unificatrice, en l'associant spécifiquement à l'électricité (F2B, 330-336). Dans ses enseignements, il évoque le concept d'énergie en fin de classe de quatrième¹³², après avoir enseigné le reste du programme à ses élèves (électrocinétique, transformations chimiques), comme une « couche / énergie par-dessus » (F2B, 759 ; voir aussi 492-506).

Chaînes énergétiques

Les chaînes énergétiques ne sont pas considérées comme des objets spécifiques à l'enseignement secondaire par F2B, qui les présente comme issues de l'enseignement supérieur :

« un prof de sciences physiques c'est-à-dire qu'en fait il a (...) fait des études de physique quoi / donc il y a des chaînes d'énergie quand on fait les moteurs en prépa par exemple / ou en licence » (F2B, 408-411)

Règles de représentation

F2B et F2C exposent les règles de représentation des phénomènes par des chaînes énergétiques comme suit :

« aujourd'hui le modèle c'est // c'est une idée de représenter la **conservation** de l'énergie // de bien différencier // **stock** / et **transfert** // les stocks d'énergie // et les transferts d'énergie (...) système stock transfert / voilà c'est tout (...) donc / l'idée c'est (...) tu prends n'importe quelle situation physique où il se passe quelque chose / il y a des **systèmes** tu les identifies tu fais des **ronds** / tous les systèmes vont être représentés par des ronds // deuxième chose / tous ces systèmes ont des stocks d'énergie / qui varient ou qui ne varient pas / donc ces stocks d'énergie on va les représenter par des rectangles / à l'intérieur des ronds // à chaque stock d'énergie est associée une forme d'énergie (...) il y a plein de formes d'énergie / l'énergie cinétique // je ne sais pas énergie nucléaire / énergie chimique / tout ça // et (...) **chaque système a un peu tous ces stocks / qui varient ou qui ne varient pas** // et un phénomène physique en fait c'est un échange d'énergie entre des systèmes donc entre les ronds on met des flèches // et sur les flèches // on ne met qu'une chose // un transfert d'énergie / pas autre chose » (F2B, 428-442)

« ça consiste à envisager toute situation // toute analyse énergétique // l'envisager / en terme de systèmes / **quels sont les systèmes en jeu / les représenter par un cercle** //

132 Nous rappelons que F2B n'a pas de classes de cinquième, depuis plusieurs années.

quels sont les stocks // associés à chacun de ces systèmes alors dans l'absolu **on peut envisager tous les stocks d'énergie** / de l'énergie nucléaire // donc l'énergie au sein d'un noyau l'énergie au sein de l'atome l'énergie // cinétique micro enfin voilà // on peut // mais / au sein de tous ces stocks // eh bien en réalité pour une situation donnée **seul un nombre souvent restreint sont pertinents** // donc **les identifier les représenter par des petits rectangles à l'intérieur des cercles** // et puis // et puis ensuite / le propre du phénomène c'est que // c'est que // voilà **il se passe des choses entre des systèmes // et // s'il se passe des choses entre les systèmes bah il y a des transferts d'énergie** // qui passe d'un système à un autre // et // et qui du coup vont // vont modifier les stocks // de ces systèmes » (F2C, 243-252)

Ici, tous les systèmes sont représentés par des ronds – mais il n'est pas précisé de quelle manière ces systèmes doivent être identifiés.

Ils contiennent de l'énergie sous différentes formes, représentées par des rectangles à l'intérieur des cercles. F2C précise que seules certaines formes d'énergie sont « pertinentes ». Les quantités d'énergie associées à chaque forme peuvent varier, mais les formateurs ne précisent pas de quelle manière ces variations sont représentées sur les chaînes. Selon F2B, ces chaînes permettent la représentation de la conservation de l'énergie, probablement en lien avec la représentation des variations de formes d'énergie dans les différents systèmes.

Des flèches qui représentent les transferts d'énergie relient entre eux les cercles.

Ces règles de représentation sont très théoriques : elles mettent en jeu des *systèmes*, des *formes d'énergie* et des *transferts d'énergie*, qui ne sont pas définis et qui ne sont pas mis en regard d'événements et d'objets réels – à l'exception des transferts d'énergie, identifiés à des phénomènes physiques (voir notre soulignage dans les citations ci-avant).

Raisonnement linéaire causal et substantialisation de l'énergie

Pour F2B, les chaînes énergétiques prennent appui sur un raisonnement linéaire causal. En particulier, leur tracé par les élèves se fait en suivant un raisonnement de ce type :

« je pars sur des situations // et puis // les situations je leur fais d'abord raconter en français // courant // ou en images // bah racontez-moi ça parle de quoi // en fait l'idée c'est de les amener progressivement à faire une chaîne d'énergie // du coup après je leur dis / identifiez les objets // donc ils identifient les objets // et puis ensuite // mettez tous les objets / ben vous allez faire des ronds / dans les objets dans / les ronds dans l'ordre un petit peu dans l'ordre de l'histoire / donc / et vous mettez le nom de l'objet à l'intérieur / c'est les systèmes // et puis // entre les ronds / si vous avez bien raconté votre histoire / vous voyez qu'ils échangent de l'énergie // donc vous mettez les flèches // ils échangent de l'énergie mais comment / quel transfert // donc là ils vont regarder / les transferts et puis ils disent eh bah tiens ça entre ça et ça / c'est sûrement électrique / et cætera et cætera / et en fait // ils trouvent très / très facilement parce que c'est hyper intuitif quand tu as que quatre transferts ils trouvent tout de suite // quel transfert c'est // et // je leur fais faire les / réfléchir sur les formes d'énergie / qui évoluent / après seulement parce que c'est moins intuitif // voilà / et puis du coup on arrive à notre chaîne d'énergie » (F2B, 775-787)

La citation précédente met en évidence à la fois un raisonnement linéaire causal, mais aussi une forme de substantialisation de l'énergie, qui part d'un lieu de stockage pour aller vers un autre lieu

de stockage. F2B n'évoque ni le fait que ces deux éléments ne sont pas conformes au concept scientifique d'énergie, ni le fait qu'ils soient présentés comme des leviers pour l'apprentissage dans des travaux de recherche en didactique (§4.4).

Stockage et transferts de l'énergie

Le modèle proposé repose sur la distinction entre stocks et transferts d'énergie. Les stocks d'énergie sont identifiables à des formes d'énergie, contenues dans des systèmes, par opposition aux transferts d'énergie. F2B et F2C évoquent plusieurs formes d'énergie mais n'en donnent pas de liste exhaustive. F2B évoque les énergies chimique, nucléaire et cinétique, en reprenant une dénomination classique, tandis que F2C parle de « l'énergie nucléaire // donc l'énergie au sein d'un noyau l'énergie au sein de l'atome l'énergie // cinétique micro » (F2C, 246-247), sans préciser ce qu'il entend par là.

Les différents modes de transferts de l'énergie

Pendant notre entretien, F2C n'a pas évoqué les différents modes de transfert de l'énergie. Il définit cependant la dissipation d'énergie par opposition aux transferts d'énergie, qui, eux, ont lieu entre systèmes de façon *contrôlée, orientée* :

« une perte / ou plus exactement une dissipation // les dissipations d'énergie // voilà // moi / moi je pense qu'aujourd'hui **c'est important de distinguer // une dissipation ce n'est pas un transfert** // quand on transfère de l'argent c'est d'un compte à un autre // quand on dissipe // l'argent il n'est plus à un endroit mais // mais il n'est plus vraiment exactement à un autre // et donc voilà moi je suis / là cette année c'est la petite évolution que je voudrais proposer au modèle parce que je pense que ça peut être important // donner une symbolisation spécifique pour **cette idée de dissipation // qui est une perte incontrôlée à la différence d'un transfert qui est une perte d'énergie d'un système mais pour aller à un autre c'est contrôlé / c'est orienté** » (F2C, 255-262)

Selon notre interprétation, F2C considère que le travail de forces conservatives est un transfert d'énergie, à l'inverse de celui des forces non conservatives. Par ailleurs, il ne relie pas la chaleur à la dissipation d'énergie.

Selon F2B, il existe quatre modes de transfert de l'énergie : le transfert thermique, le travail électrique, le travail mécanique et le rayonnement (F2B, 636). Il ne distingue pas les transferts d'énergie vus sous un angle scientifique des transferts d'énergie vus sous un angle scientifique *scolaire*, et précise que le rayonnement est parfois considéré en sciences comme inclus dans les transferts thermiques :

« même chez les physiciens // il y a beaucoup de physiciens qui / qui mettent le rayonnement dans les transferts thermiques // pour moi il faut // il faut distinguer les deux // parce que microscopiquement ça n'a rien à voir // dans un cas c'est un échange de photons et dans l'autre cas // c'est // une question par contact // euh voilà // donc ce n'est pas du tout // pour moi on ne peut pas mettre ça dans le même panier // voilà // pour moi la confusion vient encore du fait qu'il y a une confusion entre transfert et / et forme d'énergie // c'est que le rayonnement participe à la variation de température d'un corps // je suis d'accord / mais // au même titre que // qu'un frottement qui est un travail mécanique // enfin qui va être modélisé de cette façon là // au même titre que // que

l'effet Joule // qui vient de l'électricité // et du coup il y a / il y a cette confusion-là » (F2B, 639-648)

Ici, F2B introduit une distinction entre transferts thermiques et rayonnement, sur des arguments qui, en sciences, sont plutôt associés à une distinction interne, *au sein des transferts thermiques* (voir §2.1).

F2B distingue énergie électrique et transfert électrique, en appui sur le fait que le modèle qu'il utilise ne s'intéresse qu'à des systèmes macroscopiques (F2B, 341-355 ; 364-370). De notre point de vue, cette distinction ne repose pas sur le caractère macroscopique ou microscopique du système étudié, mais plutôt sur le fait que l'énergie considérée soit associée au système étudié (forme d'énergie) ou concerne la manière dont l'énergie quitte ou atteint le système étudié (transfert d'énergie).

F2B compare la confusion entre énergie électrique et transfert électrique à la confusion entre énergie thermique et transfert thermique :

« tu vois je t'ai parlé tout à l'heure de la différence entre transfert électrique et / énergie électrique // il y exactement la même confusion en fait entre énergie thermique et transfert thermique / ne serait-ce que parce que // sémantiquement on utilise le même adjectif // puisque transfert thermique a remplacé / officiellement le mot chaleur » (F2B, 574-578)

Son approche, présentée comme sémantique, est en fait basée sur le vocabulaire utilisé et non sur le sens que lui donne la physique. En effet, si on considère que les transferts thermiques sont identifiables à la chaleur, alors l'analyse qu'il propose perd de son sens. D'un point de vue scientifique, la chaleur n'est pas à l'énergie thermique ce que le travail électrique est à l'énergie électrique.

Conversions, transformations et convertisseurs d'énergie

F2B et F2C ne donnent pas le même sens au terme « conversion », mais ils considèrent tous les deux que les conversions d'énergie, en tant que caractéristique de l'énergie, ne font pas partie de leur modèle.

Conversions et transformations de l'énergie

Selon F2B, le terme « conversion » renvoie, dans l'enseignement secondaire – voire d'un point de vue scientifique – à la fois à des conversions d'énergie, à des transformations d'énergie, et à des hybridations qui mettent en jeu des changements de formes d'énergie en transferts d'énergie (ou de transferts d'énergie en formes d'énergie) (F2B, 442-464). De ce fait, il préfère ne pas utiliser le mot « conversion », et proposer un modèle qui prend appui uniquement sur les formes (et le stockage) d'énergie ainsi que sur les transferts d'énergie (F2B, 465-481).

Pendant notre entretien, F2C a mentionné une « conversion / d'énergie cinétique en / en énergie thermique » (F2C, 306) ; nous n'avons pas relevé d'autres occurrences pour *conversion* ou *transformation*. De ce fait, nous ne pouvons déterminer le sens qu'il donne à ces termes.

Convertisseurs d'énergie

F2C présente les convertisseurs comme des systèmes (ou des objets) qui reçoivent de l'énergie par un mode de transfert et en transmettent selon un autre mode. Selon lui et selon F2B, l'idée de convertisseur est secondaire et ne fait pas partie du modèle scientifique scolaire de l'énergie qu'ils promeuvent (F2C, 221-232 ; F2B, 414-444).

Cependant, lorsque F2C propose un exemple qui illustre le modèle *système stock transfert*, il fait immédiatement appel à la notion de « convertisseur pur », *a priori* identifiable à un système (ou à un objet ?) dont la quantité d'énergie ne varie pas au cours du temps :

« tu prends le système éolienne // si on le prend comme système d'intérêt // et si on l'envisage pour ce qu'il est souvent c'est-à-dire en régime stationnaire et donc convertisseur pur // donc l'éolienne elle est en train de / en régime stationnaire elle / voilà son stock d'énergie / il est constant » (F2C, 292-295)

Il apparaît que la notion de convertisseur fait partie du modèle scientifique scolaire de l'énergie *appliquée* par F2B, bien qu'il ne fasse pas partie du modèle *initial* qu'il promeut.

Conservation de l'énergie

F2B évoque le principe de conservation de l'énergie uniquement lorsqu'il parle de l'utilisation des chaînes énergétiques au lycée (F2B, 509-525). Cette propriété de l'énergie ne fait pas partie du modèle scientifique scolaire de l'énergie qu'il propose pour le collègue.

Pour F2C, la conservation de l'énergie est une propriété mise en évidence sur les chaînes énergétiques (F2C, 233-234 ; 282-283 ; 464-472). Cependant, il ne définit pas la conservation de l'énergie et ne l'illustre pas à travers des exemples – les citations mentionnées ci-dessus reprennent de façon exhaustive ses propos relatifs à la conservation de l'énergie, à l'exception de ceux liés à la définition de l'énergie (voir ci-avant). La description que F2C fait des chaînes énergétiques ne permet pas non plus de mettre en évidence le sens qu'il donne à la conservation de l'énergie.

Dégradation de l'énergie

Pendant notre entretien, F2B n'a pas évoqué la dégradation de l'énergie (aucune occurrence pour les mots de la famille de *dégradation*, *dissipation*, *pertes*).

Par contre, F2C évoque à plusieurs reprises la dissipation de l'énergie, caractéristique de l'énergie qui n'est pas prise en compte dans le modèle initial *système stock transfert*. Il souhaite proposer au GRC-F2 une évolution de ce modèle permettant la représentation des phénomènes dissipatifs, aboutissant au « modèle système stock transfert / dissipation » (F2C, 277-278 ; 329-330).

F2C oppose *dissipation* d'énergie et *transfert* d'énergie. Il considère que les transferts ont lieu entre systèmes, tandis que la dissipation traduit une « perte » d'énergie d'un système « vers l'extérieur » (voir ci-avant, *transferts d'énergie*).

Cette définition de la dissipation de l'énergie n'est pas conforme à celles que nous avons présentées aux chapitres 2 et 3, pour deux raisons : d'une part, la dissipation n'est pas opposable aux transferts ; d'autre part, il ne s'agit pas d'un mode de transfert de l'énergie, mais d'une

propriété de l'énergie *en soi*, qui traduit le caractère plus ou moins utilisable des formes que peut prendre l'énergie.

Par ailleurs, le modèle que F2C propose décrit la dissipation de l'énergie comme une perte d'énergie, en opposition avec l'idée de conservation de l'énergie.

Utilisation du modèle et des chaînes énergétiques

Des chaînes représentatives pour le collège selon F2B

F2B présente les chaînes énergétiques comme étant exclusivement *descriptives* au collège (F2B, 492-506 ; 536-539). Au lycée, il propose une utilisation des chaînes énergétiques quantitative, liée à la résolution de tâches mettant en jeu la conservation de l'énergie (F2B, 509-525). Cette proposition traduit un modèle progressif de l'énergie, du qualitatif vers le quantitatif, conforme aux propositions issues de la recherche en didactique.

Utilisation des chaînes énergétiques pour représenter les transformations d'énergie

Les chaînes *système stock transfert* reposant sur la distinction entre transferts et stockage de l'énergie, il est difficile de déterminer dans quelle mesure elles peuvent être une représentation fidèle d'une transformation de l'énergie.

Selon F2C, les chaînes *système stock transfert* permettent de représenter des transformations de l'énergie, mais ne sont pas un outil réellement pertinent pour analyser ces situations (F2C, 267-286), pour lesquelles il propose d'utiliser un type de représentation complémentaire, mieux adapté à la caractéristique de transformation de l'énergie. Ceci rappelle la complémentarité entre types de chaînes proposées en didactique que nous avons mise en évidence au §4.5.

Modèle scientifique scolaire de l'énergie de F2A

Avant que le GRC-F2 décide de s'intéresser au thème de l'énergie, F2A n'était ni intéressé, ni compétent – selon ses propres termes – sur ce sujet. Le travail effectué par le groupe et par F2A, de façon plus individuelle, lui ont permis de modifier son modèle scientifique scolaire de l'énergie, voire d'en élaborer un nouveau, qu'il juge plus pertinent :

« c'était pas un sujet qui m'intéressait au départ / enfin je ne voyais pas trop / je n'étais pas à l'aise dessus // quand je faisais les réactions chimiques je ne me posais pas la question de / d'y associer l'énergie par exemple // c'est / c'est tout récent du coup / ça m'a sensibilisé hein / de la même façon que // que dans un autre stage / j'ai été sensible à l'écriture mathématique / enfin bref // enfin on ne va pas changer de sujet mais en fait / voilà ça m'oblige à réfléchir / sur ce sujet-là auquel je n'aurais pas réfléchi / donc // et à essayer de trouver des solutions // mais je dois dire que ça // ça m'a // c'était assez // assez épuisant // je ne comprends pas que ce soit un tel chantier hein // c'est vrai c'est // bon ben voilà // donc j'ai été obligé d'y réfléchir parce qu'il y avait quand même une formation derrière et tout ça // » (F2A, 688-696)

Pertinence et place des chaînes énergétiques dans le modèle scientifique scolaire de l'énergie selon F2A

Lorsque le groupe a choisi de travailler sur le thème de l'énergie, F2A considérait les chaînes énergétiques comme incohérentes et non pertinentes (F2A, 76-80 ; 123-125), trop abstraites (F2A,

137-160 ; 419-421 ; 214-216). Selon lui, les chaînes énergétiques *système stock transfert* sont peu utiles (F2A, 243-245).

Comme dit précédemment (§14.2), il met en avant en particulier le fait que ces chaînes ne soient pas une représentation symbolique spatiale de la réalité (F2A, 213-230 ; 290-309).

Par contre, F2A envisage d'utiliser des chaînes un peu différentes des chaînes *système stock transfert* :

« si on commence à quantifier là c'est intéressant parce qu'on peut illustrer / que rien ne se perd rien ne se crée tout se transforme / c'est-à-dire que / on doit retrouver ses petits quelque part // on doit retrouver l'énergie manquante quelque part et c'est ça qui m'intéresse finalement dans les diagrammes énergétiques / mais c'est une approche beaucoup plus tardive en fait / ce n'est pas en introduction que je vais faire ça / c'est-à-dire que // ce que j'aime bien / si on fait bien ces diagrammes d'énergie c'est que s'il y a trois flèches / une entrante et deux sortantes / et qu'on n'a pas pu mesurer une des deux sortantes on peut y arriver grâce à cette / grâce à cette conservation de l'énergie // donc ça je trouve ça intéressant » (F2A, 246-253)

Bien que F2A ne le précise pas, cette représentation présente une différence majeure avec celle proposée par F2B et F2C : pour que l'égalité entre transferts mentionnée soit valable, les systèmes considérés ne doivent subir aucune variation d'énergie en interne – ils doivent être considérés comme ce que F2C appelle des « convertisseurs purs ».

F2A propose également d'utiliser d'autres chaînes énergétiques, qui tiennent compte en particulier de l'évolution temporelle des événements (chaînes de type *avant-après*) (F2A, 237-239 ; 241-244).

Caractéristiques de l'énergie dans le modèle scientifique scolaire de F2A

Comme le montre la définition que F2A donne à l'énergie, il ne présente pas ce concept comme une grandeur physique associée à un système – du moins, dans un contexte d'enseignement secondaire.

Pour F2A, l'énergie est un concept transversal, qu'il associe à l'ensemble des domaines de la physique et de la chimie qu'il enseigne (nous l'avons largement évoqué au §14.2).

Les transferts et les formes d'énergie

En ce qui concerne les transferts d'énergie, F2A ne propose pas clairement d'adaptation du modèle scientifique de l'énergie pour l'enseignement : il évoque les transferts d'énergie par *travail* et *chaleur*.

F2A mentionne un grand nombre de formes d'énergie : énergie thermique, chimique, lumineuse, électrique, mécanique, cinétique, potentielle, qu'il définit partiellement par des exemples. En particulier, il présente l'énergie électrique comme suit :

« ce qui rentre dans la résistance eh bien c'est des électrons à un potentiel élevé et ce qui ressort c'est des électrons à potentiel faible / donc // on va dire qu'il y a // il y a **une chute de potentiel // qui correspond au transfert d'énergie // donc voilà / c'était je veux arriver / je voulais arriver à ça c'est ce que / c'est comme ça que je présente l'énergie électrique** c'est que / à chaque fois qu'il y a un paquet de charges je parle de

paquets de charges / à chaque fois qu'il y a un paquet de charges qui chute d'un volt eh bien il y a un joule qui a été / fourni // et donc s'il y a deux paquets de charges ça fera deux joules / et si ça chute pas de un volt mais de trois volts eh bien / deux paquets de charges trois volts bah il y aura une chute de six / de six joules » (F2A, 217-225).

F2A évoque des bilans énergétiques associés à certains systèmes. Dans ce contexte, il analyse l'énergie qui entre, qui sort et qui s'accumule dans le système, sans distinguer les formes d'énergie (associées au système) des transferts d'énergie (F2A, 260 ; 262-266). Il ne reprend pas la catégorisation proposée par F2B et F2C, selon laquelle les formes d'énergie sont identifiées à des stocks d'énergie contenus dans des systèmes et opposées aux transferts d'énergie (en particulier, voir notre mise en gras de la citation précédente).

La puissance

F2A aborde la puissance en classe de troisième de façon progressive, pour introduire la formule qui relie puissance, énergie et durée, puis les différentes unités de puissance, en lien avec des appareils électriques de la vie quotidienne (F2A, 611-650). Il évoque de nombreux exemples issus de plusieurs domaines de la physique-chimie, comme les combustions (« puissance de chauffe » associée à des réchauds à gaz et à bois ; F2A, 537-561) et, surtout, l'électrocinétique.

Les valeurs de puissance mentionnées par F2A sont le plus souvent associées à des appareils et non à des transferts (F2A, 584 ; 588 ; 619 ; 629-630).

Conservation de l'énergie

F2A évoque la conservation de l'énergie essentiellement en lien avec les chaînes énergétiques, dans un premier temps sous un angle purement local, en appui sur des chaînes énergétiques de type *pendant* :

« sinon elles ne disent pas grand-chose hein // c'est-à-dire OK on se doute qu'une lampe transforme de la / de l'électricité en chaleur et lumière c'est quand même // c'est pas / il n'y a pas besoin d'un diagramme pour ça en fait // et / et **si on commence à quantifier là c'est intéressant parce qu'on peut illustrer / que rien ne se perd rien ne se crée tout se transforme / c'est-à-dire que / on doit retrouver ses petits quelque part // on doit retrouver l'énergie manquante quelque part** et c'est ça qui m'intéresse finalement dans les diagrammes énergétiques / mais c'est une approche beaucoup plus tardive en fait / ce n'est pas en introduction que je vais faire ça / c'est-à-dire que // ce que j'aime bien / **si on fait bien ces diagrammes d'énergie c'est que s'il y a trois flèches / une entrante et deux sortantes / et qu'on n'a pas pu mesurer une des deux sortantes on peut y arriver grâce à cette / grâce à cette conservation de l'énergie** // donc ça je trouve ça intéressant et // et voilà donc pour moi c'est // c'est-à-dire // quand je vois qu'il y a une lampe (...) elle reçoit de l'électricité / elle fournit de la lumière (...) donc pour moi c'est ça la différence de / de ces chaînes énergétiques c'est / c'est voilà c'est ce côté **possibilité de faire un bilan donc de trouver ce qui manque // et la possibilité de faire à n'importe quelle échelle un bilan purement local avec flèche entrante flèche sortante** » (F2A, 243-285)

Il évoque également la conservation de l'énergie sous un angle global, de façon implicite, en lien avec l'utilisation de chaînes énergétiques de type *avant-après* :

« moi je peux y trouver un intérêt [aux chaînes énergétiques] // si ça devient un peu quantitatif aussi / **c'est-à-dire sur une certaine durée** // avec un certain courant // enfin de manière générale pas seulement en électricité parce que l'électricité c'est très spécifique » (F2A, 237-239)

« de manière générale // sur les chaînes énergétique bon // **j'y trouve un intérêt si elles sont // quantifiées // soit sur un tour de roue / soit sur sur une certaine durée / soit //** parce que // sinon elles ne disent pas grand-chose hein » (F2A, 241-244)

Transformations, conversions et convertisseurs d'énergie

Puisque F2A ne distingue pas les formes et les transferts d'énergie, il ne propose pas de distinction entre transformations et conversions d'énergie (F2A, 158-159 ; 244-245 ; 676-677).

Au cours de notre entretien, F2A a évoqué la distinction entre réservoirs et convertisseurs d'énergie, qu'il ne trouve pas pertinente. Selon lui, les convertisseurs d'énergie ne sont pas opposables aux réservoirs d'énergie, dans le sens où ils peuvent accumuler ou non de l'énergie (F2A, 275-285).

Le modèle de F2A ne comporte pas de réservoirs, mais uniquement des convertisseurs, qui changent la forme de l'énergie (au sens de F2A), indépendamment de la variation de la quantité d'énergie qu'ils contiennent (F2A, 675-679).

Dégradation de l'énergie

Au cours de l'entretien, F2A n'a évoqué ni la dégradation, ni la dissipation de l'énergie de façon explicite. Il a utilisé l'expression « pertes » d'énergie à une reprise, sans l'explicitier (en disant qu'elles étaient négligées).

Cependant, il évoque l'idée de dégradation de l'énergie, qu'il identifie *dans un premier temps* (« c'est une première approche ») au caractère exothermique ou endothermique des transformations chimiques (F2A, 520-536).

Coexistence de deux modèles scientifiques scolaires de l'énergie au sein du collectif de formateurs

F2B et F2C présentent leur modèle – c'est-à-dire les chaînes *système stock transfert* – comme un objet coconstruit au sein du GRC-F2, et F2C précise que ce modèle a émergé à son initiative (F2C, 351-353). Il dit avoir proposé cette représentation après s'être inspiré d'une « publi sur la didactique de l'énergie », dont il n'a pas les références (F2C, 356-357 ; 360-361).

Cependant, nous avons mis en évidence la coexistence de deux modèles scientifiques scolaires de l'énergie distincts au sein du GRC-F2. La différence majeure entre ces modèles repose sur la définition de l'énergie, grandeur que F2B et F2C associent uniquement à des systèmes, et opposent aux transferts d'énergie.

La représentation des phénomènes par les chaînes énergétiques n'est pas commune aux deux modèles : F2B et F2C promeuvent une représentation de systèmes, contenant des stocks d'énergie et reliés entre eux par des flèches, qui représentent des transferts d'énergie. F2A trouve ces représentations peu utiles et susceptibles de gêner les apprentissages. Selon lui, des chaînes

énergétiques peuvent toutefois être utilisées pour représenter quantitativement la conservation de l'énergie, sous un angle local ou global.

F2A est conscient de l'existence de ces modèles distincts (F2A, 214-223 ; 258-272). Conscient de ces différences, il a exposé aux autres formateurs son point de vue, dans l'attente de discussions contradictoires (F2A, 329-341). Cependant, F2B, F2C et F2D n'ont pas évoqué ces divergences de modèles. Ils présentent leur modèle comme globalement consensuel, bien que F2B note une différence dans les représentations de chaînes proposées par F2A, mais sans rapport direct avec les différences que nous avons mises en évidence (schématisation des stocks d'énergie par des rectangles superposés et non côte à côte : F2B, 692-737).

14.4. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons montré que les formateurs n'utilisent pas de vocabulaire commun, de modèle commun et de représentations communes pour évoquer les phénomènes énergétiques. De ce fait, le stage de formation F2 apparaît comme conçu par un ensemble d'individus plutôt que par un collectif.

F2A et, dans une moindre mesure, F2B mobilisent des connaissances professionnelles liées à l'enseignement et à l'apprentissage de l'énergie, parfois contradictoires. Ce type de connaissances apparaissent rarement dans le discours de F2C et F2D, plus généralistes.

La proposition de formation est ouverte : elle s'adresse à des enseignants de physique-chimie, de SVT et de technologie, qui enseignent en collège et en lycée. Cependant, les formateurs ont tous un parcours professionnel en physique-chimie. Ils mobilisent des connaissances scientifiques – au sens large – et proposent des expérimentations plus proches de celles de la physique et de la chimie que des autres disciplines scientifiques. Aucun formateur n'a évoqué les chaînes énergétiques de la technologie.

L'ensemble des formateurs proposent un modèle de l'énergie ancré dans le vocabulaire de la vie courante, que F2A juge compatible avec le vocabulaire scientifique, à l'inverse de F2B et F2C. Malgré cela, les enjeux sociétaux liés à l'énergie (utilisation des ressources, production d'électricité, pollution, etc.) n'ont pas été abordés par les formateurs.

Par la préparation du stage de formation, F2A a fait évoluer sa représentation de l'énergie et le modèle scientifique scolaire de l'énergie qu'il propose. Ce modèle n'opère pas de distinction formelle entre formes et transferts d'énergie ou entre conversions et transformations d'énergie. Les chaînes énergétiques sont perçues comme peu utiles, en dehors de la quantification des échanges énergétiques. Ce modèle, qui prend appui sur le vocabulaire de la vie quotidienne, permet de relier entre eux tous les domaines de la physique et de la chimie.

F2B et F2C proposent un modèle qui repose sur la distinction entre les stocks d'énergie, contenus dans des systèmes, et les transferts d'énergie. Il est indissociable de chaînes énergétiques, qui suivent un formalisme particulier, décrit par les formateurs. Il permet *a priori* de représenter des situations associées à tous les domaines de la physique-chimie. Nous n'avons pas pu identifier la manière dont les formateurs représentent l'évolution temporelle des événements sur les chaînes qu'ils proposent (évolution des « stocks », représentation de la durées de l'événement considéré).

F2B et F2C ne définissent pas les formes et les transferts d'énergie de la même manière : il est possible que le modèle qu'ils proposent ne soit pas totalement unifié.

15. Analyse du stage de formation F2

Le stage de formation F2 a eu lieu au cours de l'année scolaire 2020-2021. Il s'est déroulé en distanciel, sur deux journées complètes (quatre demi-journées de trois heures), à un mois d'écart l'une de l'autre. Les formateurs F2A, F2B, F2C et F2D étaient présents pendant l'ensemble du stage, qu'ils ont construit et animé ensemble.

22 enseignants-stagiaires étaient inscrits à ce stage :

- répartition par discipline :
 - 18 enseignants de physique-chimie ;
 - 2 enseignants de technologie ;
 - 1 enseignant de SVT.
- répartition par type d'établissement scolaire :
 - 13 enseignants de collège ;
 - 5 enseignants de lycée général et technologie ;
 - 3 enseignants de lycée professionnel.

Du fait des restrictions liées au contexte sanitaire (Covid-19), le stage de formation, initialement prévu en établissement, a dû se dérouler à distance (*via* une application de visioconférence). Les enregistrements réalisés étant de qualité variable, la séance n'a pas pu être analysée dans son intégralité. En particulier, l'ensemble des travaux de groupe n'ont pas été enregistrés.

Ce stage de formation est composé d'un ensemble de tâches proposées par les formateurs pour les enseignants-stagiaires qui, pour la plupart, se déroulent comme suit :

- consignes (éventuellement précédées d'une brève introduction) ;
- répartition des enseignants-stagiaires dans des salles virtuelles, résolution de la tâche ;
- restitution générale des travaux de groupe ;
- proposition de correction par un des formateurs.

La chronogénèse de l'ensemble de la formation se trouve en annexe D.

Dans la première section de ce chapitre, nous décrivons et analysons brièvement les huit tâches qui composent le stage de formation, en mettant en évidence les épisodes dont la transcription pourra être analysée en vue de répondre à nos questions de recherche.

Les lignes de transcriptions associées (en annexes A) sont numérotées et codées selon la norme : F2-numéro_de_tâche, numéro_de_ligne (par exemple, « F2-3, 162 » fait référence à la 162^e ligne de l'épisode correspondant à la tâche 3 de la formation ; la notation « F2A, F2-3, 162 » précise que F2A est l'auteur des propos rapportés). Les lignes qui commencent par la lettre « S » correspondent aux interventions d'enseignants-stagiaires. Lorsque plusieurs enseignants-stagiaires interviennent au cours d'une discussion, nous les distinguons les uns des autres (S1, S2, etc.)

Dans la deuxième section, nous mettons en évidence le modèle scientifique scolaire de l'énergie qui a été proposé pendant la formation et nous interrogeons, en particulier, l'utilisation des chaînes énergétiques dans le contexte de ce stage.

15.1. Tâches à destination d'enseignants-stagiaires

Au début de chaque journée de stage, les formateurs précisent les objectifs généraux de formation :

« Articulation langage courant et langage scientifique
Analyse énergétique d'expériences et de situations via un modèle dédié
Conception d'activités et progressivité des apprentissages »

et le déroulé prévu pour l'ensemble du stage :

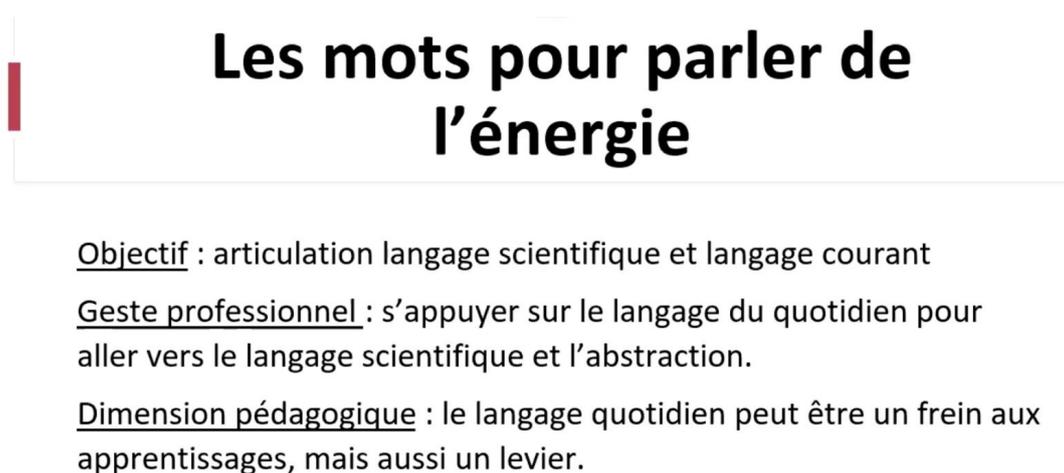
« 1^{re} journée matin : langage et analyses énergétiques d'expériences
1^{re} journée après-midi : analyses énergétiques de situations et carte conceptuelle
2^e journée matin : approche quantitative de l'énergie, relations entre les grandeurs et ordre de grandeurs
2^e journée après-midi : ateliers d'approfondissements »

Dans cette section, nous allons décrire les huit tâches qui ont été proposées aux enseignants-stagiaires (consignes données par les formateurs, modalités de résolution – en groupe ou non, avec ou sans aide, durée, etc. –, modalités de correction). Nous proposerons une analyse pour chacune d'entre elle, plus ou moins approfondie (selon que le contenu de la tâche est plus ou moins proche de nos questions de recherche) et précise (en lien avec les conditions d'enregistrement des séances).

Tâche 1 : « Les mots pour parler de l'énergie »

Déroulement

F2D introduit la tâche 1 en prenant appui sur la diapositive reproduite à la Figure 96.



Les mots pour parler de l'énergie

Objectif : articulation langage scientifique et langage courant

Geste professionnel : s'appuyer sur le langage du quotidien pour aller vers le langage scientifique et l'abstraction.

Dimension pédagogique : le langage quotidien peut être un frein aux apprentissages, mais aussi un levier.

Figure 96: diapositive introductive à la tâche "Les mots pour parler d'énergie"

Cette diapositive est lue par F2D, qui précise que la tâche proposée met en jeu des bandes dessinées.

Les enseignants-stagiaires disposent d'un document comportant plusieurs séries d'images de bandes dessinées et la liste d'expressions suivante :

- des actions inefficaces ;
- capter les flux d'énergie de la nature ;
- les forces de la nature en action ;
- un stock d'énergie ;
- décharge lente d'énergie ;
- des outils pour des actions efficaces¹³³ ;
- les personnes, armes et appareils trop puissantes ;
- décharge violente d'énergie ;
- limiter les pertes.

Ils sont amenés à associer chaque série d'images à une expression.

Modalités prévues :

- 25 minutes de travail en groupes (*non enregistré*) ;
- 15 minutes de débriefing en groupes (*non enregistré*) ;
- 20 minutes de travail en groupes pour proposer une « mise en mots en langage scientifique » (*non enregistré*) ;
- 15 minutes de débriefing (ensemble).

Conformément aux prévisions, le travail de groupe a duré une heure, et a été suivi d'un « débriefing » final, mené par F2D. Au début de ce temps, un enseignant-stagiaire fait remarquer que les images de BD partagées par les formateurs pour la correction ne sont pas les mêmes que celles qui leur ont été fournies.

F2D lit les diapositives de correction prévues, sans les commenter, puis laisse la parole à F2A pour d'éventuels ajouts de précisions. La plupart des diapositives ne comportent pas d'éléments présentés comme scientifiques au sens large – qui englobe le scientifique scolaire –, comme l'illustrent les citations suivantes :

« On parle du feu du ciel pour l'éclair, du feu des enfers pour la lave, mais ce sont des apports de chaleur. »

« Une personne énergique enchaîne des actions difficiles, sans s'épuiser. Énergie créatrice : produire en continu des idées, des créations étonnantes. »

« Une personne puissante est capable de réussir des épreuves difficiles (actions d'éclat) : soulever une grosse pierre, etc. »

« Mystère du métabolisme : qu'est-ce qui rend ces personnes si performantes ? Elles s'alimentent pourtant normalement. »

« Les actions inefficaces : on exerce une force sur un objet, mais il ne se déplace pas, ne se déforme pas. Il ne reçoit aucune énergie, aucun travail. »

« S'efforcer sur une action peut être douloureux : forcer, se donner un effort = se faire une hernie, une déchirure musculaire. »

« Comment produire de la chaleur ? Par frottements ou concentration de rayonnement, produire la chaleur suffisante pour démarrer une combustion. »

« Tous ces appareils sont puissants, car ils produisent des actions d'éclat : très brèves. »

133 L'expression proposée aux enseignants-stagiaires pendant la formation est erroné (« Des actions efficaces ») ; F2A soulignera cela lors de la mise en commun finale.

Les « stocks » d'énergie sont évoqués et certaines formes d'énergie sont mentionnées : cinétique (« rôle de la masse et de la vitesse »), potentielle élastique (« tendre un matériau élastique, étirer ou comprimer un ressort »), potentielle de pesanteur (sans précision), chimique (« du combustible bois, charbon, essence »).

Analyse

Par ce travail, un lien est établi entre le vocabulaire de la vie courante et le vocabulaire scientifique, cependant nous n'avons pas pu identifier de façon claire le sens donné aux différents mots évoqués.

Nous posons la question de la place de cette tâche dans le cadre de la modélisation.

Ici, les formateurs ne présentent pas l'univers des bandes dessinées comme imaginaire et ne répondant pas nécessairement aux lois de la physique. Ils demandent aux enseignants-stagiaires de décrire ce qui se passe dans l'imaginaire des bandes dessinées sans questionner sa relation au réel, et semblent considérer les bandes dessinées comme une représentation *a priori* fidèle du monde empirique.

Par ailleurs, le monde théorique scientifique n'est pas identifié en tant que tel : les expressions qui figurent sur les diapositives finales font appel de façon majoritaire au monde théorique de la vie quotidienne, et les termes scientifiques mentionnés ne sont pas définis. Le sens qu'ils prennent dans la vie quotidienne n'est pas dissocié de celui qu'ils revêtent en sciences.

Tout se passe comme si les enseignants stagiaires étaient amenés à avoir une activité de modélisation dans laquelle le monde empirique est identifié au monde de la bande dessinée alors que le monde théorique est exclusivement associé à la vie quotidienne.

Selon nous, cette activité ne permet pas d'atteindre l'objectif annoncé – l'articulation du vocabulaire de la vie courante avec le vocabulaire scientifique.

Lors de l'introduction de la deuxième tâche, F2C tient des propos qui tendent à confirmer notre analyse :

« le travail sur le vocabulaire et les BD a permis de montrer que le vocabulaire de l'énergie peut être riche / aussi polysémique / pas toujours très clair / et là on va commencer à commenter avec les mots de la science des manip » (F2C)

Les propos tenus pendant la résolution de cette première tâche n'ont pas été transcrits, leur analyse ne nous permettant pas *a priori* d'apporter d'éléments de réponse supplémentaires à nos questions de recherche.

Tâche 2 : « Quatre expériences simples et fondatrices »

Déroulement

La réalisation de cette tâche, présentée par F2C, a pour objectif de mettre des mots scientifiques sur des situations expérimentales. Pour ce faire, quatre vidéos présentées comme expérimentales sont proposées aux enseignants-stagiaires :

« Expérience chaleur 1 : du ballon de baudruche au moteur

Expérience chaleur 2 : chaleur et intuition
Expérience électricité 1 : le supercondensateur
Expérience électricité 2 : l'alternateur manuel »

Dans chacune des expériences, l'expérimentateur explique l'expérience qu'il réalise, en utilisant un vocabulaire scientifique. Nous n'avons pas procédé à une analyse fine de ces vidéos¹³⁴.

En groupes, les enseignants-stagiaires sont invités à visualiser une vidéo « chaleur » et une vidéo « électricité », et à répondre pour chacune d'entre elles aux questions :

« Quels sont les phénomènes en jeu ? »
« Quelle analyse énergétique mener ? »

F2C ajoute que les formateurs font le choix de ne pas préciser ce qu'ils entendent par *analyse énergétique* :

« qu'est-ce qu'on entend par analyse énergétique ? eh bien voilà on se pose la question sur l'énergie qu'est-ce qui se passe // pour l'instant on veut rester très ouvert sur ce qu'on entend par analyse énergétique » (F2C)

Le travail de groupe dure environ 40 minutes (*non enregistré*). Les formateurs, répartis dans les groupes des enseignants-stagiaires, sont chargés de prendre des notes pendant l'activité (qui ne seront pas reprises pas la suite, à notre connaissance).

Lorsque les enseignants-stagiaires rejoignent la salle virtuelle principale, F2C prend la parole pendant une quinzaine de minutes pour présenter une analyse énergétique des quatre expériences mettant en jeu *systèmes*, *stocks* et *transferts*. Cette partie de la formation, qui introduit le modèle scientifique scolaire, a été transcrite.

Description des vidéos

Expérience chaleur 1 :

Cette vidéo propose une modélisation du fonctionnement d'un moteur Stirling : un cylindre surmonté d'un ballon de baudruche est surmonté d'une roue mobile. On chauffe le cylindre à la flamme, ce qui conduit à une augmentation du volume du gaz contenu dans le ballon de baudruche et à une mise en mouvement de la roue. Puis on refroidit le cylindre à l'aide d'eau froide, ce qui conduit à une diminution du volume de gaz contenu dans le ballon de baudruche et une mise en mouvement de la roue.

Expérience chaleur 2 :

Cette vidéo est un micro-trottoir. On présente à des passants un disque dur (métallique) et un livre, et on leur demande de comparer leurs températures (lequel est le plus chaud, lequel est le plus froid, ont-ils la même température ?) Les passants touchent les objets et répondent que le disque dur est le plus froid. Les températures des deux objets sont ensuite mesurées : elles sont identiques. On propose alors aux passants de faire fondre deux glaçons en les mettant en contact d'un objet en

¹³⁴ Bien qu'elle ait pu être intéressante, nous n'avons pas jugé utile de procéder à une analyse de ces vidéos, d'une part parce qu'elle n'aurait pas pu permettre de répondre à nos questions de recherche (les formateurs ne commentent pas le contenu de ces vidéos), d'autre part parce que cette analyse nous aurait demandé de mobiliser des éléments théoriques supplémentaires, en dehors de notre cadre de recherche.

aluminium et d'un objet en plastique, et on leur demande sur quel support la fusion sera la plus rapide. Les passants constatent que la fusion est plus rapide sur le morceau d'aluminium. On leur explique alors que « l'aluminium fait fondre la glace plus vite que le bloc de plastique parce qu'il conduit la chaleur vers le glaçon plus vite ». La vidéo se conclut sur la distinction entre la température et le *ressenti de la température*, lié à la « vitesse à laquelle la chaleur est conduite ».

Expérience électricité 1 :

L'expérimentateur présente un supercondensateur, source d'énergie électrique lorsqu'il est chargé. Il charge le condensateur, puis il le branche à une lampe. la lampe brille fortement et son éclat devient de plus en plus faible au cours du temps. L'expérimentateur calcule la charge de ce condensateur – 30 coulombs – et en déduit la durée pendant laquelle la lampe va briller, en tenant compte de l'intensité du courant qui la traverse. Il évoque la possibilité de déterminer la puissance instantanée reçue par la lampe en fonction du temps.

Expérience électricité 2 :

Un alternateur est mis en route manuellement, à vide. L'expérimentateur explique qu'il ne fournit pas un grand effort pour le mettre en mouvement. Il branche l'alternateur sur un ensemble de lampes en dérivation, puis fait tourner la manivelle. Les lampes s'allument, et l'expérimentateur constate qu'il doit produire un effort important pour parvenir à faire tourner la manivelle à une vitesse similaire : il rencontre une plus forte résistance. Par la suite, l'expérimentateur branche l'alternateur sur une voiture électrique miniature, puis fait tourner la manivelle. L'expérimentateur constate qu'il fournit un effort important alors que le moteur se met à tourner.

Dans un second temps, l'alternateur est branché sur une « pile à combustible », que l'expérimentateur recharge en soulignant que ça lui « demande un effort ». Il branche ensuite la pile sur la voiture électrique, dont le moteur se met à tourner.

Proposition d'analyse énergétique par F2C

F2C décrit chacune des expériences (chaque enseignant-stagiaire n'ayant travaillé que sur deux d'entre elles), puis il en propose une « analyse énergétique ». Pour ce faire, il choisit un système, décrit l'évolution du stock d'énergie contenu dans ce système et/ou les transferts énergétiques en provenance et/ou à destination de ce système, comme le montrent les citations ci-après.

Première expérience

Description :

« on a une canette un ballon de baudruche / qu'on chauffe // ou qu'on refroidit avec de l'eau / et puis / et puis en fait on construit le piston le plus basique qui soit / mais en fait il y a cette idée que ce // que c'est aussi à la base de / de tous les moteurs » (F2C, F2-1, 6-9)

Interprétation en termes scientifiques :

« pour produire un mouvement à partir de chaleur eh bien en fait / il faut une variation de volume¹³⁵ // et le seul objet qui permet ça ce sont les gaz » (F2C, F2-1, 10-12)

¹³⁵ Il est pourtant possible de mettre en mouvement un objet par des phénomènes de conduction et / ou de convection au sein de liquides.

Proposition de modélisation :

« on va commencer à vous amener vers une réflexion en terme de systèmes // de stocks / et de transferts // là le système qui va être intéressant là-dessus c'est // c'est le / c'est l'équivalent du piston c'est cette // la canette // il a son stock // d'énergie thermique qui peut augmenter qui peut diminuer selon qu'on le chauffe ou qu'on le refroidit // mais surtout il va générer un transfert // un transfert / un transfert mécanique un travail / via / via ce piston-là / et en fait / nous // on va vous amener / on veut vous amener vers raisonner comme ça ça va être un peu les trois mots clefs / système stock et transfert » (F2C, F2-1, 14-20)

Deuxième expérience

Description :

« on demande à des // à des gens // qu'est-ce qui va fondre le plus vite / un glaçon est-ce qu'il va fondre plus vite sur du plastique ou de l'aluminium / et puis ils disent bah sur l'aluminium est froid / donc / ça va refroidir moins vite et puis le plastique est plus chaud / donc bah ça va refroidir / ça va moins fondre // et en fait il se passe exactement le contraire » (F2C, 23-27)

Interprétation en termes scientifiques :

« le phénomène physique en jeu c'est l'idée de transfert thermique / là vous l'aurez vu puis sa rapidité / la conductivité » (F2C, F2-1, 28-29)

Proposition de modélisation :

« là aussi // nous pensons que raisonner en terme de systèmes stocks et transferts / ça va être un super levier pour / pour lever des malentendus / si on prend le système // masse d'eau // masse d'eau soit à l'état liquide soit à l'état solide ce glaçon / eh bien il a son stock d'énergie interne stock d'énergie thermique // et puis il va y avoir // il va y avoir un transfert // plus ou moins rapide / selon le matériau / et c'est un transfert / c'est un transfert thermique // et // là aussi vous voyez comment avec ces mots-là on peut // voilà assez aisément poser analyser des situations » (F2C, F2-1, 39-45)

Troisième expérience

Description :

« ce condensateur dans un premier temps il est chargé / avec un / générateur de courant continu / sur // je crois 20 ou 30 secondes // et puis ce et puis on débranche / les fils du générateur on le met sur une ampoule // et puis // elle brille // de moins en moins mais elle brille // là ce qui est intéressant dans cette expérience / elle prend toute sa force lorsqu'elle est mise en regard // et qu'on / avec une pile / et qu'on remplace le supercondensateur par une pile / par une pile électrique voire / voire une pile à hydrogène qu'on a chargée nous-même » (F2C, F2-1, 49-55)

Interprétation en termes scientifiques :

« la question qu'on veut vous poser c'est // elle est où l'énergie électrique là-dedans ? / on va se dire bah tiens si elle brille c'est qu'il y a une énergie électrique // sauf que si on se dit que l'énergie électrique / est-ce que ça va être un transfert un stock // eh bien là //

si on regarde / ici (...) eh bien là // si on regarde / ici // vous avez sous vos yeux la manip du supercondensateur // un stock / d'énergie / strictement électrique // là dans ce supercondensateur c'est vraiment de l'énergie électrique // si on met une pile à la place bah on n'a plus un stock d'énergie électrique c'est un stock d'énergie chimique » (F2C, F2-1, 55-62)

Proposition de modélisation :

« si on se met à raisonner en stocks systèmes transferts / eh bien ça clarifie / parce qu'on voit que si on prend le système / le système condensateur / eh bien il y a / il a son énergie électrique qui diminue / qui est transférée en énergie / euh en transfert / qui est transféré en // en transfert électrique // la pile / idem on peut le prendre comme système et il y a un transfert électrique / et en récepteur la lampe / eh bien elle reçoit un transfert électrique // qu'elle réémet en transfert rayonnement // là voilà là l'idée c'est vraiment de mettre l'accent sur // l'ambiguïté de l'énergie électrique et la force // de raisonner en système stock transfert // qui permet de clarifier // pour bien enfoncer cette idée » (F2C, F2-1, 72-82)

Quatrième expérience

Description :

« on a un alternateur manuel / et une petite manivelle qu'on peut tourner / dans un premier temps / c'est F2A / notre collègue qui / qui tourne / à vide bah ça tourne sans difficulté // et l'instant d'après il le branche sur // une suite de lampes // en parallèle // et là / alors il les allume certes / mais c'est beaucoup plus dur / alors bien sûr ça ne se voit pas à la vidéo que c'est plus dur / le vivre c'est autre chose / et ensuite il débranche les fils et il les branche à une pile / une pile à hydrogène / pareil / eh bien il la charge // et il tourne / et c'est difficile » (F2C, F2-1, 87-94)

Interprétation en termes scientifiques / proposition de modélisation :

« l'énergie électrique en tant que stock // bah il n'y en a pas / il n'y a pas de stock d'énergie électrique // si on regarde où sont les systèmes / bah on a un stock d'énergie chimique de / de F2A qui tourne la / le / l'alternateur // là on a un stock d'énergie à la fin aussi avec le // la pile // on a // la lumière qui reçoit un transfert électrique / la lampe // mais / il n'y a pas de stockage d'énergie électrique / par contre il y a bien de l'électricité il y a bien un transfert électrique » (F2C, F2-1, 95-101)

Analyse

Ces quatre expériences, présentées comme « fondatrices », sont restreintes à deux domaines scientifiques : la thermodynamique (uniquement en terme de chaleur) et l'électrocinétique. Elles sont *a priori* éloignées des domaines scientifiques des SVT et de la technologie.

Pour les décrire, F2C présente la modélisation comme une gradation dans la rigueur du langage. Pour chaque expérience, il commence par une description empirique de la situation qui fait appel au langage courant. Puis, il « pose » un vocabulaire scientifique, qui explique la situation (respectivement, pour chaque expérience, il utilise les mots : mouvement, chaleur et variation de volume ; transfert thermique et conductivité ; énergie électrique, transfert, stock, énergie chimique ;

énergie électrique, énergie chimique). Enfin, il propose une description qui met en jeu les concepts de système, stock et transfert.

Cette tâche fait appel à des notions de physique connues comme difficiles à définir, à apprendre et à enseigner. Or, F2C ne propose pas de définition claire pour les mots scientifiques qu'il utilise : il définit la chaleur comme le mot scientifique qui signifie « transfert thermique », et, dans une certaine mesure, l'énergie électrique – dont la définition ne fait pas consensus, tant chez les formateurs que parmi les enseignants-stagiaires (nous y reviendrons par la suite).

Les règles de modélisation ne sont pas explicitées, mais semblent déduites intuitivement de la description empirique de la situation. Par exemple, les systèmes sont implicitement identifiés aux objets pris en considération, et les transferts et formes d'énergie ne sont pas définis. Par ailleurs, la modélisation proposée se fait sans représentation ou support visuel.

Tâche 3 : « Modélisation et chaînes »

Déroulement

Après avoir commencé à présenter le modèle scientifique scolaire de l'énergie (fin de tâche 2), les formateurs proposent une tâche sur la modélisation et les chaînes énergétiques. Il s'agit, pour les enseignants-stagiaires, d'interroger « la place de la modélisation / schématisation », en proposant une chaîne énergétique associée aux situations suivantes :

- « Situation 1 : un moteur solaire
- Situation 2 : la bouilloire électrique
- Situation 3 : une centrale nucléaire
- Situation 4 : chute sans frottement / chute avec frottement »

Déroulement prévu :

- 30 minutes de travail de groupe pour « produire une chaîne d'énergie partageable à l'écran » (*non enregistré*) ;
- 12 minutes de présentation des chaînes à l'ensemble des enseignants-stagiaires (3 minutes par groupe) ;
- 15 minutes de débriefing général, pendant lesquelles les formateurs « présenter[ont leurs] propres réflexions sur le sujet » (F2C).

F2D attribue une chaîne à tracer par groupe de quatre ou cinq enseignants-stagiaires, de façon arbitraire. Lors de la mise en groupes, elle précise que les formateurs, bien que présents dans les salles virtuelles, ne vont pas apporter d'aide aux enseignants-stagiaires.

Le travail de groupe dure environ 40 minutes, et est suivi de la présentation des chaînes par chacun des groupes, sans commentaires de la part des formateurs.

F2B fait une synthèse de ces représentations : les chaînes sont diverses et n'obéissent pas à des règles communes. Il partage d'autres chaînes, trouvées dans des sujets de brevet (chaînes de la technologie et de la physique) ou sur Internet, dont il met en évidence les nombreuses différences. Il précise :

- « alors nous on va se centrer sur la physique » (F2B, 25)

Il propose ensuite un « modèle de l'énergie » (Figure 97), et une représentation des quatre situations à l'aide de ce modèle.

Nous avons procédé à la transcription de cette partie du stage de formation, et nous avons reproduit les chaînes énergétiques complètes proposées pendant la correction (Figure 98, Figure 99, Figure 100, Figure 101, Figure 102). F2B les a construites progressivement, dans un premier temps, sans faire apparaître les systèmes représentés en gris – qu'il conseille de représenter ou non selon les choix personnels de l'enseignant – et sans tenir compte des « pertes » (flèches « chaleur » reliées au système « environnement »).

MODÈLE Systèm__Stock-Transfert (SST)

Objectifs du modèle:

Quels messages

Tout part des systèmes.
Leurs stocks d'énergie varient.
Ils échangent de l'énergie par transfert.

Modéliser la conservation : pas de création ou de disparition.

Choix de modélisation :

Quelles conventions, simplifications

- 1 système → 1 rond
 - 1 système → plusieurs stocks
 - 1 stock → 1 rectangle dans le rond
- 1 transfert → 1 flèche, un point de départ, un point d'arrivée

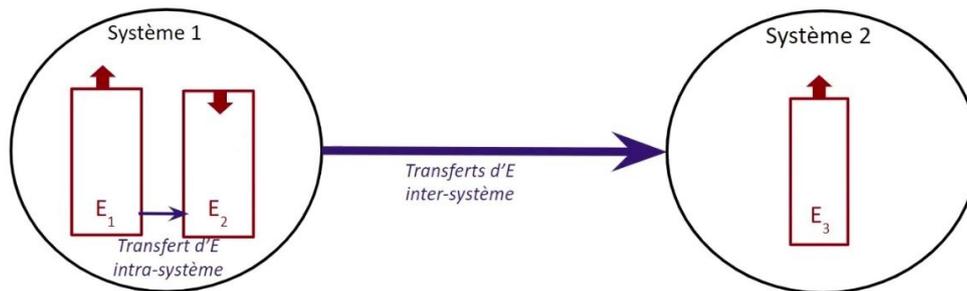


Figure 97: règles de modélisation "système stock transfert"

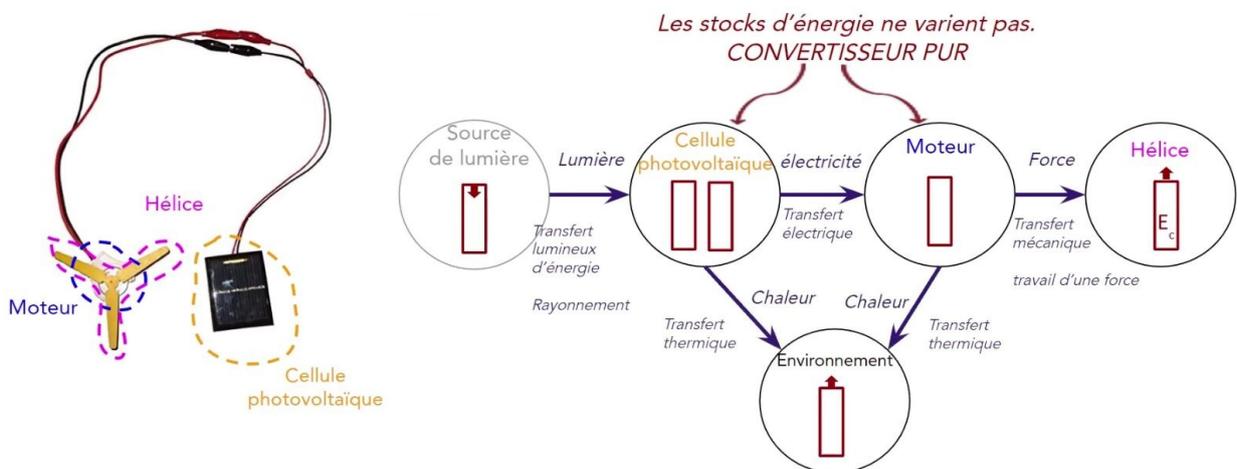


Figure 98: modélisation d'un moteur solaire

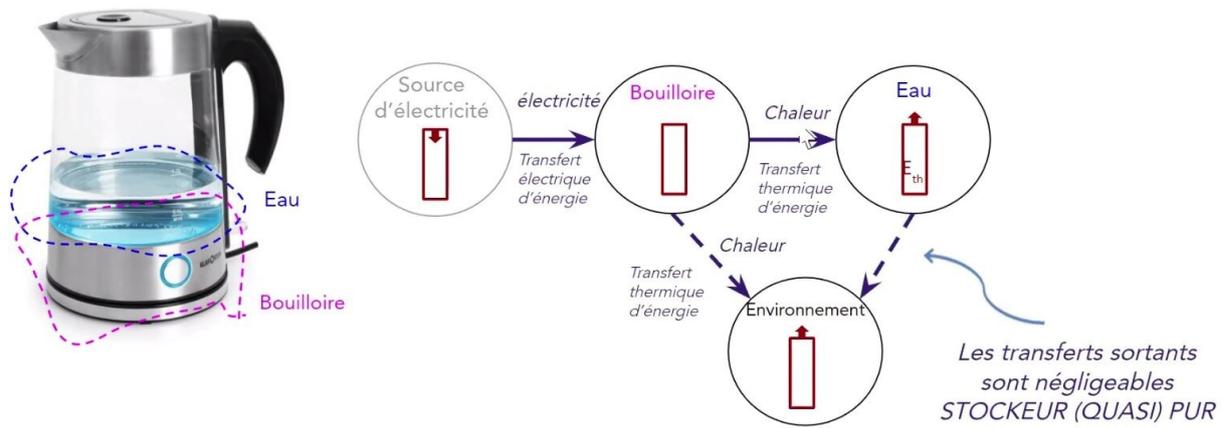


Figure 99: modélisation d'une bouilloire

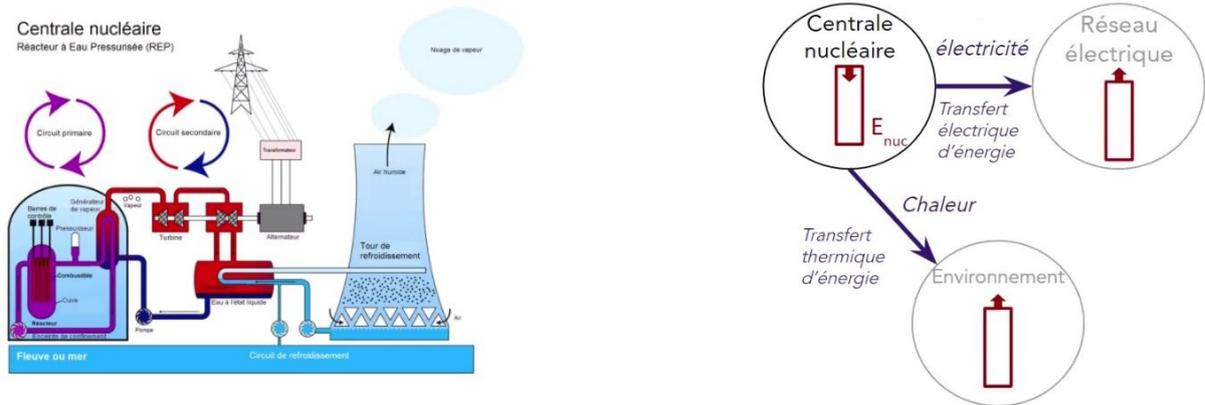


Figure 100: modélisation d'une centrale nucléaire

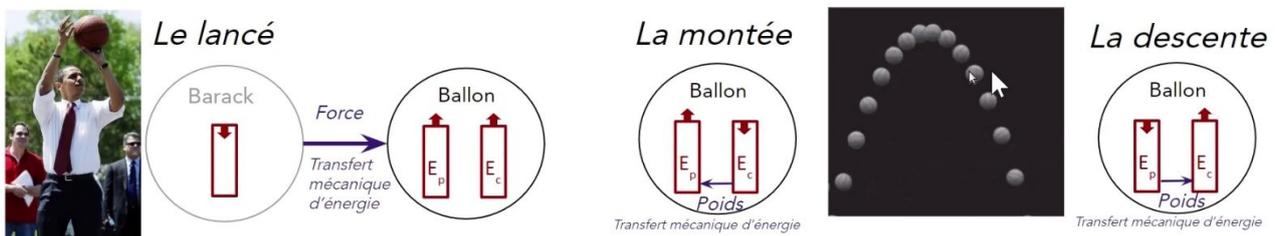


Figure 101: modélisation d'une chute libre



Figure 102: modélisation d'une chute avec frottements

Analyse

Les formateurs proposent aux enseignants-stagiaires de tracer des chaînes énergétiques, sans leur recommander l'utilisation de normes particulières. Ils mettent en évidence les différences qui existent entre leurs propres représentations, mais aussi entre les représentations que l'on peut trouver sur Internet. Le besoin de règles et de normes communes est mis en évidence, ce qui conduit les formateurs à introduire leur propre modèle, qu'ils appellent « système-stock-transfert » (ou « SST »).

Dans un premier temps, nous nous intéressons à la présentation de ce modèle et aux règles de représentation proposées pour les chaînes énergétiques (Figure 97).

Modèle général

Certains éléments de la Figure 97 posent question, parmi lesquels :

- la phrase « Tout part des systèmes », que nous n'avons pas comprise ;
- l'utilisation des flèches dans la case « quelles conventions, simplifications » ne renvoie pas à un sens unique et clair : la première, la troisième et la quatrième semblent signifier « est représenté par », tandis que la seconde semble avoir le sens de « contient » ;
- le sens donné au mot « transfert » n'est pas celui de la physique, puisque les formateurs prennent en considération des « transferts d'énergie intra-système » ;
- d'après le document, dans ce modèle, les stocks d'énergie de *tous* les systèmes « varient » ;
- nous ne savons pas s'il doit y avoir correspondance entre les éléments figurant dans les cases de gauche et ceux inscrits dans les cases de droite.

Nous remarquons aussi certaines incohérences entre les explications (partie supérieure de la figure) et la représentation (chaîne énergétique) : un seul rectangle figure dans le second système ; nous ne comprenons pas en quoi la représentation proposée est en lien avec la conservation de l'énergie (pas de compensation entre les flèches violettes, ni entre les flèches rouges, ni entre l'ensemble des flèches).

D'après les auteurs, les chaînes énergétiques proposées représentent certaines caractéristiques de l'énergie : les formes d'énergie, qui n'apparaissent pas de façon évidente sur la chaîne, les transferts, dont le sens n'est pas celui de la physique, et la conservation de l'énergie, qui n'apparaît pas sur la chaîne proposée.

Selon nous, ces chaînes pourraient toutefois représenter non seulement les formes d'énergie, mais aussi les caractéristiques de transfert d'énergie (entre systèmes), de transformation d'énergie (au sein des systèmes), voire de conservation de l'énergie, en tenant compte de la hauteur des différents rectangles représentés dans les systèmes (cercles). Dans ce cas, elles doivent également prendre en compte la durée du phénomène modélisé, qui n'a pas été mentionnée par les formateurs.

Enfin, les chaînes proposées peuvent conforter certaines idées fausses relatives à l'énergie (voir §4.4), qui n'ont pas été évoquées par les formateurs :

- la substantialisation de l'énergie, appuyée par l'utilisation du terme « stock » et sa représentation par des rectangles ;
- l'idée d'une quantification de l'énergie « connue » et identique pour l'ensemble des systèmes, associée à la hauteur des bâtons ;
- le raisonnement linéaire causal, commun à l'ensemble des chaînes énergétiques.

Chaînes énergétiques

Nous proposons ici une brève analyse de l'ensemble des chaînes qui ont été proposées par les formateurs, reproduites plus haut.

Conformément à notre analyse générale du modèle, la représentation des formes d'énergie, de la conservation de l'énergie et des transferts d'énergie sur ces chaînes énergétiques pose question : les formes d'énergie représentées ne sont pas clairement identifiables ; les flèches qui représentent l'évolution des quantités d'énergie (épaisses rouges) ne se compensent pas au sein d'une chaîne ; les transferts « intra-systèmes » représentés ici ne correspondent pas à des connaissances scientifiques – dans un contexte fondamental ou scolaire.

Les mots qui figurent sur les flèches sont, d'après les formateurs, associés soit au registre du langage commun (électricité, chaleur, force, lumière), soit au registre du langage scientifique (transfert électrique / transfert électrique d'énergie, transfert thermique d'énergie, transfert mécanique / travail d'une force / transfert mécanique d'énergie, transfert lumineux d'énergie). L'usage du mot « force » pour désigner un transfert d'énergie – un travail – peut être une source de confusions pour les élèves. Mentionner le mot « chaleur » comme faisant partie du vocabulaire du quotidien pose également question.

Nous remarquons que le choix des systèmes représentés sur les schémas n'est pas conforme à celui qui est habituellement associé aux systèmes en physique : la délimitation ne correspond pas aux contours de l'objet et n'est pas précise, en particulier dans le cas de la bouilloire (Figure 99) (de plus, le récipient en tant que tel n'entre pas en compte dans la modélisation proposée).

Dans la chaîne qui représente le moteur solaire (Figure 98), le système *moteur* est considéré comme un « convertisseur pur » : son énergie ne varie pas au cours du temps. Nous en déduisons que cette chaîne représente une situation stationnaire. Ceci n'est pas compatible avec le fait que la quantité d'énergie cinétique contenue dans l'hélice augmente au cours du temps, comme mis en évidence sur la chaîne (ici, c'est le choix du système *final* qui pose question).

Par ailleurs, les chaînes associées à la chute libre (Figure 101) et à la chute avec frottements (Figure 102) ne prennent pas en considération l'ensemble des systèmes en jeu : en particulier, la Terre n'est pas mentionnée, et le poids – ou le travail du poids, comme précisé par F2B – est

présenté comme un transfert interne au système. Cette représentation soulève à la fois la question du choix des systèmes, qui ne peut pas être fait uniquement de façon intuitive, et de la pertinence de ces chaînes énergétiques dans le domaine de la mécanique.

Dans la chaîne associée à la chute avec frottements, on remarque que le système « air » est différent des systèmes habituels : il est représenté en gris et ne comporte aucun rectangle, symbole des stocks d'énergie. Ici, les phénomènes dissipatifs sont représentés comme une disparition d'énergie ; une lecture simple de la chaîne proposée va à l'encontre du principe de conservation de l'énergie. De plus, la flèche entre les systèmes représente une « force de frottement », *a priori* orientée *du ballon vers l'air*. Le discours qui accompagne le partage de la chaîne ne permet pas de répondre aux questions que nous venons de soulever :

« on va retrouver ces idées-là dans l'analyse énergétique d'un // d'un système qui est soumis / d'un système en chute mais soumis à des frottements // cette fois si on regarde ici la variation d'énergie mécanique va être négative // force non conservative / transfert externe / je ne vais pas plus loin là-dessus » (F2B, F2-5, 78-81)

La question de la temporalité de la chaîne n'a pas été abordée par les formateurs et il n'est, selon nous, pas possible de déterminer si ces chaînes sont de type *pendant* ou de type *avant-après*. Cependant, la chaîne représentant le lancer du ballon (à gauche de la Figure 101) est différente des autres, bien qu'elle n'ait pas été présentée en tant que telle : elle représente une situation à un instant donné, qui correspond à l'impulsion donnée par le lanceur au ballon – il ne s'agit ni d'une chaîne *pendant* associée à un état stationnaire, ni d'une chaîne *avant-après*. L'associer à une augmentation de l'énergie potentielle du ballon pose question (il s'agit d'une augmentation infime).

Cette brève analyse met en évidence certaines limites de la conformité du modèle proposé aux lois de la physique, ainsi que certaines limites de son domaine d'application.

L'ensemble des erreurs et des questions que nous avons soulevées ne nous permet pas de procéder à une analyse généraliste des chaînes énergétiques proposées pendant cette formation.

Tâche 4 : « Carte conceptuelle »

Déroulement

Dans un premier temps, F2B présente aux enseignants-stagiaires une carte conceptuelle de l'énergie, qui regroupe des mots et expressions de la vie quotidienne (partie gauche de la carte) et des sciences (vers la droite de la carte). Nous avons procédé à la transcription de cette partie du stage de formation, et nous avons relevé les principaux éléments de la carte conceptuelle.

À l'extrémité droite de la carte est écrit le mot « énergie », d'où partent deux traits aboutissant aux bulles : « transferts d'énergie » et « formes d'énergie ».

Les « transferts d'énergie » sont reliés par quatre traits aux mots et expressions :

- « rayonnement » ;
- « transfert électrique : travail électrique » ;
- « transfert mécanique : travail d'une force » ;
- « transfert thermique ».

Deux traits partent des « formes d'énergie », l'un marqué « macroscopique » et relié à une bulle « énergie mécanique », l'autre marqué « microscopique » et relié à une bulle « énergie interne ».

L'énergie mécanique est reliée à l'« énergie cinétique globale » et à l'« énergie potentielle d'interaction externe », elle-même reliée à trois autres formes d'énergie (« énergie potentielle gravitationnelle », « énergie potentielle élastique », « énergie potentielle électromagnétique »).

L'énergie interne est reliée aux « énergie potentielle d'interaction », « énergie de masse » et « énergie cinétique microscopique ».

D'autres « formes d'énergie en langage scientifique » sont listées : « énergie de changement d'état », « niveaux d'énergie électromagnétiques », « énergie chimique », « énergie nucléaire », « énergie thermique ».

Plus à gauche, on peut lire des « formes d'énergie langage courant », parmi lesquelles « énergie éolienne », « énergie nucléaire », « géothermie », ainsi que des « sources d'énergie langage courant », parmi lesquelles « Soleil », « magma », « pile », « électricité », « la houle », « matière radioactive ».

Les enseignants-stagiaires sont ensuite répartis en groupes, où ils sont amenés à utiliser la carte conceptuelle selon leurs envies, par exemple pour la construction d'une carte adaptée à un niveau d'enseignement donné, ou pour répondre à des questionnements du type :

« moi j'ai envie de travailler sur le vocabulaire de l'électricité parce qu'il y a quelque chose que j'ai besoin de clarifier pour moi / pour mes élèves // pareil sur la lumière / pareil sur la mécanique / pareil sur la thermique » (F2B)

Les « idées activités » proposées sur le diaporama sont :

- « - identifier les branches "électricité", "lumière", "mécanique", "thermique", débattre des choix de vocabulaire » ;
- sélectionner les éléments pour construire une carte conceptuelle collège. »

Le travail de groupe dure un peu plus de vingt minutes, et n'est pas suivi d'une mise en commun générale.

Analyse

Les consignes associées à cette tâche (« idées activité », consignes orales et contenu de la carte) parlent du concept scientifique d'énergie *de la physique*, sans le mettre en relation avec les autres disciplines scientifiques. Les expressions technologiques (comme « géothermie » et « électricité ») sont classées à gauche de la carte, dans la partie présentée comme non scientifique.

Les auteurs de la carte présentent les quatre transferts d'énergie comme déconnectés du reste de la carte : ils ne les associent ni aux autres éléments présentés comme scientifiques, ni aux mots et expressions de la vie quotidienne.

La catégorisation des formes d'énergie est globalement cohérente avec celle de la thermodynamique (§2.1), mais aucune des formes scientifiques n'est définie : nous ne pouvons pas savoir quel sens leur est attribué par les formateurs.

Les autres « formes d'énergie en langage scientifiques » n'ont pas été présentées : nous ne savons pas à quoi elles correspondent ni comment elles sont reliées aux formes d'énergie précédemment évoquées.

Aucune distinction n'est faite entre les formes d'énergie (et les transferts) *scientifiques* et *scientifiques scolaires*.

Comme lors de la tâche 3, l'accent est mis sur le passage d'un vocabulaire de la vie courante à un vocabulaire scientifique, et non sur une activité de modélisation, qui relie le monde empirique au monde théorique.

Tâche 5 : « Conservation de l'énergie »

Les enseignants-stagiaires sont invités à appliquer le principe de conservation de l'énergie à deux des situations vues précédemment (tâche 3) : la « bouilloire » et la « chute libre / chute avec frottement ». En groupes, ils disposent de 20 minutes pour « écrire le premier principe dans ces situations-là » (*non enregistré*).

Ils présentent ensuite leurs propositions à l'ensemble des enseignants-stagiaires (durée : 5 minutes).

F2B discute brièvement de ces propositions, puis propose une correction qui met en jeu des chaînes énergétiques : nous avons procédé à la transcription de cette partie du stage de formation, et nous reproduisons ci-après les chaînes énergétiques accompagnées des propositions de correction partagées (Figure 103, Figure 104, Figure 105, Figure 106, Figure 107).

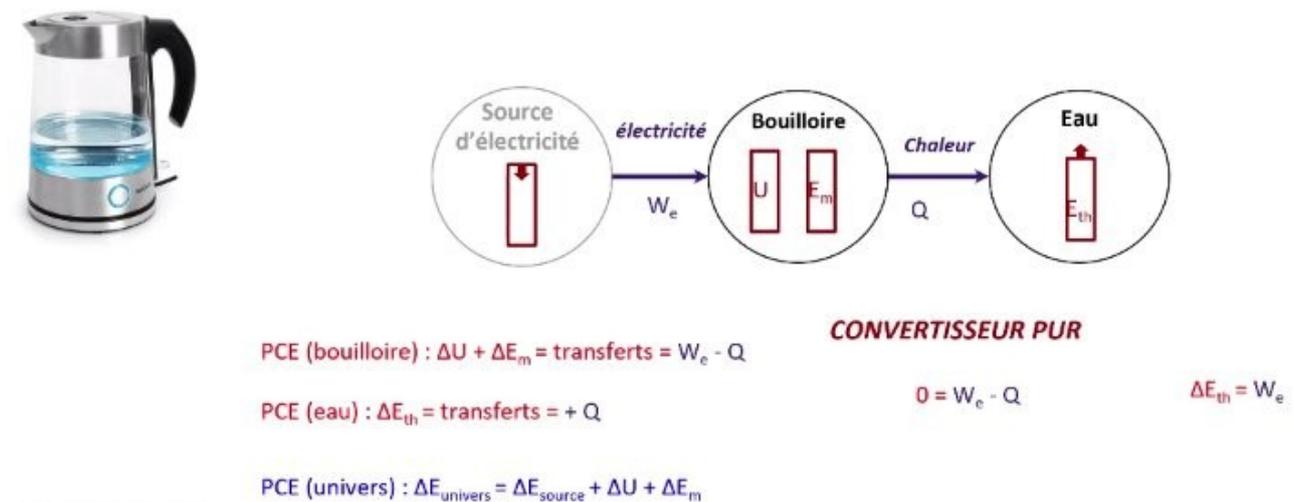
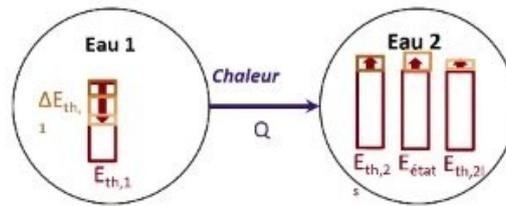
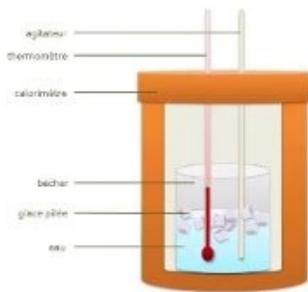


Figure 103: chaîne et bilan énergétique associés à une bouilloire



PCE (eau 1) : $\Delta E_{\text{eau1}} = \text{transferts} = -Q$

PCE (eau 2) : $\Delta E_{\text{eau2}} = \text{transferts} = +Q$

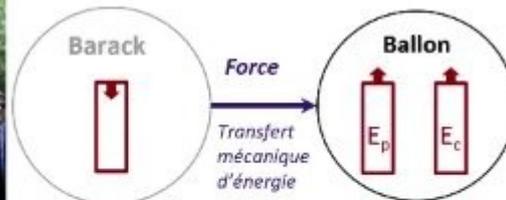
PCE (univers) : $\Delta E_{\text{univers}} = \Delta E_{\text{eau1}} + \Delta E_{\text{eau2}}$

Pertinent → pas d'info sur le transfert thermique entre les deux masses d'eau

Figure 104: chaîne et bilan énergétique associés à la mise en contact d'eau liquide et d'eau solide



Le lancé



PCE (ballon) : $\Delta E_m = \text{transferts} = W_{fb} > 0$

Définition : $\Delta E_m = \Delta E_p + \Delta E_c > 0$

$E_{\text{méca}}$ augmente

Figure 105: chaîne et bilan énergétique associé à un lancer

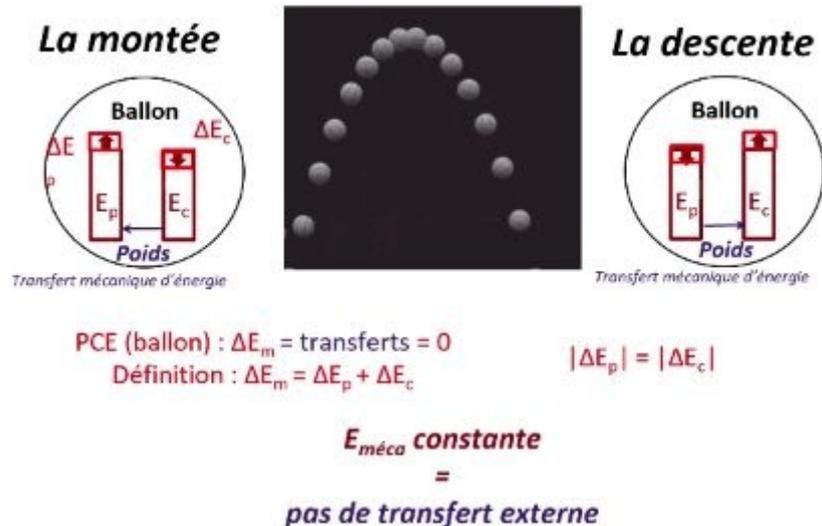


Figure 106: chaînes et bilan énergétique associés à une chute libre

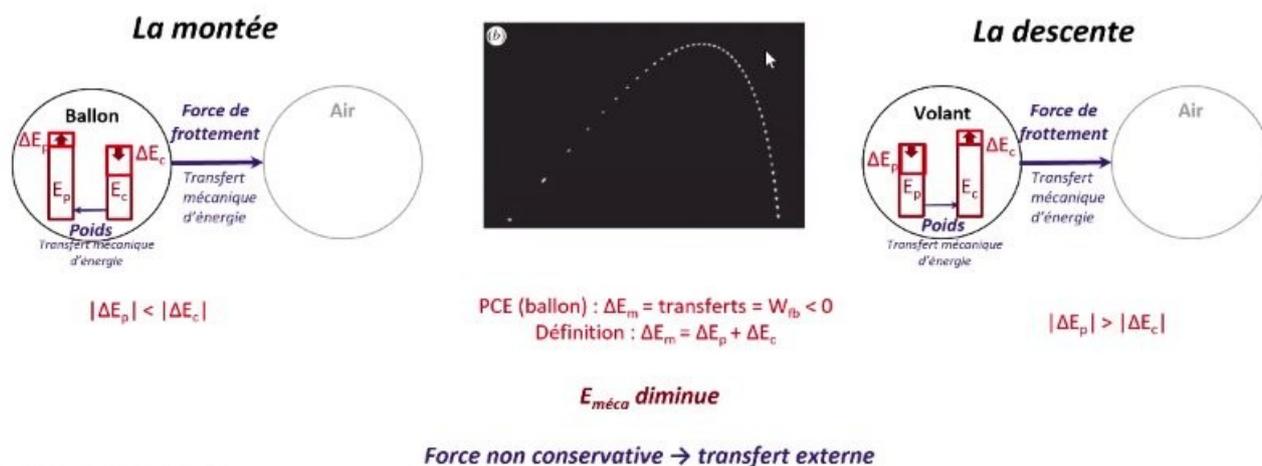


Figure 107: chaînes et bilan énergétique associés à une chute avec frottements

F2B présente ensuite une synthèse de la méthodologie utilisée (Figure 108), puis un bilan de la première journée de formation (Figure 109).

Principe de conservation de l'énergie

On mets les notations mathématiques sur la chaîne d'énergie

On l'applique à un système :

$$\Delta U + \Delta E_m = \text{transferts entrants} - \text{transferts sortants}$$

On l'applique à l'univers :

$$\Delta E_{\text{univers}} = \text{Somme } \Delta E_{\text{systemes}}$$

Figure 108: synthèse "principe de conservation de l'énergie"

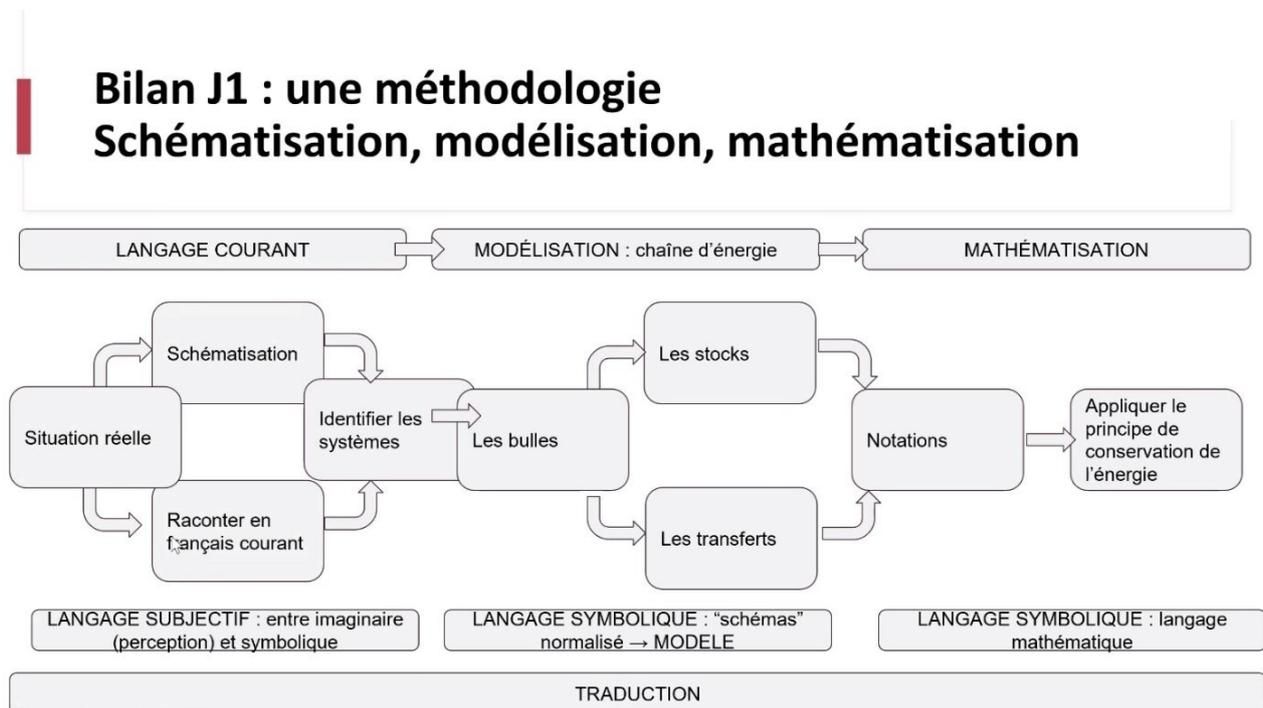


Figure 109: diapositive de bilan de la première journée de formation

Analyse

F2B propose une analyse énergétique pour chacun des systèmes en jeu pris séparément, puis pour l'ensemble des systèmes en interaction. Dans ce cas, F2B dit appliquer le principe de

conservation de l'énergie « sur l'ensemble de l'univers », dont la variation d'énergie est nulle (F2B, F2-5, 40-42 ; 47-49 ; 53-54 ; 85-86). Il ne met pas en relation les systèmes pris en considération et l'univers, et ne mentionne pas le caractère *isolé* de cet ensemble de systèmes.

Sur les chaînes, apparaissent les indications « Q » et « W_e », qui portent une dimension temporelle : il s'agit de la quantité d'énergie transférée entre deux systèmes *pendant une certaine durée*. Or, aucun des quatre formateurs ne mentionne la dimension temporelle des phénomènes énergétiques à analyser. Par exemple, voici la manière dont F2B présente les bilans associés au fonctionnement de la bouilloire et à la montée du ballon :

« on va repartir de notre chaîne d'énergie dans le cas simple / où on va négliger les pertes // et donc // on // si on applique le principe de conservation au système bouilloire // on a sa variation d'énergie interne plus sa variation d'énergie mécanique // qui est égale à la somme des transferts // que j'aurais dû faire en bleu // alors qu'est-ce qu'on a comme transferts // on a le travail électrique / et on a la chaleur // le travail électrique c'est avant / on va mettre plus / et puis la chaleur c'est après on va mettre moins » (F2B, F2-5, 17-22)

« si je prends la montée // du ballon // là je vais appliquer le principe de conservation de l'énergie au ballon // la variation d'énergie mécanique est égale à la somme des transferts mais ici elle est nulle parce qu'il n'y a pas de transfert externe // donc elle est nulle » (F2B, F2-5, 63-65)

La spécificité du lancer du ballon (Figure 105), seul phénomène *instantané* représenté par une chaîne, n'est pas évoquée. Le bilan associé à cette situation est présenté comme semblable aux autres :

« si je reprends la chute maintenant // dans le lancer / j'applique le principe de conservation au ballon / variation d'énergie mécanique du ballon plus somme des transferts le travail de la force est positif / voilà l'énergie mécanique augmente » (F2B, F2-5, 60-62)

Nous ne comprenons pas le sens donné à la *variation* d'énergie potentielle. Par ailleurs, la chaîne correspondant au lancer, que nous avons déjà décrite précédemment, ne représente à première vue pas la conservation de l'énergie (deux flèches de stocks vers le haut contre une vers le bas). Ici, la chaîne énergétique et le bilan énergétique comportent des éléments similaires qui demandent à être clarifiés.

La seule situation dans laquelle des phénomènes dissipatifs sont pris en considération est celle de la chute avec frottements (Figure 107). Ici, la dégradation est associée aux forces de frottements, et tout se passe comme si l'énergie dégradée disparaissait.

D'une façon générale, nous nous demandons dans quelle mesure c'est la chaîne énergétique qui permet de réaliser l'analyse énergétique. En effet, dans le document de synthèse (Figure 108), les éléments présentés comme nécessaires pour établir un bilan énergétique sont, pour chaque système, la connaissance des *transferts entrants* et *sortants* ainsi que des formes d'énergie dont la quantité est susceptible de varier. Or, ces éléments sont *a priori* également nécessaires pour le tracé des chaînes énergétiques. En particulier, sur certaines chaînes (Figure 104, Figure 106, Figure 107), les auteurs représentent la quantification des variations de la quantité d'énergie contenue dans les

systemes sous certaines formes : le rectangle qui forme la partie supérieure du stock correspond à cette variation, positive si la flèche rouge est orientée vers le haut, négative si elle est orientée vers le bas. Cet élément permet une représentation de la conservation de l'énergie (ou de sa non-conservation dans le cas de la chute avec frottements, Figure 107), mais il n'est *a priori* pas possible de le figurer sur la chaîne *avant* que le bilan énergétique soit établi.

Ici, la chaîne a une fonction représentative qui facilite, selon les formateurs, la modélisation mathématique de chaque situation.

Tâche 6 : « Convertisseurs »

Cette tâche porte sur la définition du mot « convertisseur », et est introduite comme suit :

« Partie 1

Le concept de convertisseur est très présent dans les analyses énergétiques de situations. Comment définir ce concept dans le cadre du modèle Système Stock Transfert ? »

Les objectifs annoncés sont de « questionner le concept de convertisseur » et « se réappropriier le modèle SST »¹³⁶.

F2C partage une définition du mot « convertisseur » qu'il dit avoir trouvée sur Internet en effectuant une recherche pour « convertisseur énergie collègue » ; nous la reproduisons à la Figure 110.

- Définition "internet" :

Un convertisseur d'énergie assure la **conversion d'une forme d'énergie en une ou plusieurs autres**. Dans le cas d'une voiture, son moteur est un convertisseur transformant l'énergie chimique contenue dans l'essence en énergie mécanique, mais aussi en chaleur.

Figure 110: définition du mot "convertisseur" trouvée sur Internet

Les enseignants-stagiaires disposent d'un certain nombre de mots, présentés sous forme d'un nuage de mots (Figure 111).

136 Cette tâche est donnée au début de la seconde journée de formation.



Figure 111: nuage de mots à classer dans la tâche "convertisseurs"

Dans un premier temps, ils sont invités à répondre, en groupe, à la consigne reproduite ci-après (durée : 10 minutes) :

« Parmi ces objets, identifier ceux qui, à votre avis, sont des convertisseurs [au sens de la définition proposée] »

Ce travail de groupe (*non enregistré*) est suivi d'une mise en commun (durée : environ 8 minutes), à la suite de laquelle F2C prend la parole pour préciser le sens donné au mot convertisseur dans le « modèle système stock transfert » ; nous avons procédé à la transcription de cette partie du stage de formation.

Le modèle ne comporte pas de convertisseurs, mais distingue deux « situations limites » : « les situations de conversion sans stockage / déstockage » et « les situations de pur stockage / déstockage d'énergie ». F2B propose de s'intéresser davantage à « l'idée de stock » qu'à « l'idée de conversion ».

F2C donne aux enseignants-stagiaires une seconde consigne mettant en jeu les mots de la Figure 111 :

« Mettre en schéma les deux définitions.
Revoir si besoin la classification des objets au regard de ces définitions. »

Le travail de groupe dure environ un quart d'heure (*non enregistré*), et est suivi d'une mise en commun.

Analyse

Ici, les formateurs partent d'une définition de convertisseur trouvée sur Internet, présentée comme ni consensuelle, ni scientifique. La question du sens donné à ce mot initialement par les enseignants-stagiaires n'est pas posée.

Lors de la première mise en activité en groupe, les enseignants-stagiaires doivent s'approprier cette définition et travailler avec. Or, les formateurs leur diront par la suite qu'ils ne donnent pas de sens au mot *convertisseur*, en justifiant leur choix par une absence de consensus apparente en science et pour l'enseignement. Ni les convertisseurs, ni les conversions ne sont définis dans ce modèle. Cependant, les formateurs utilisent ces expressions, comme vu précédemment (Figure 98, Figure 103).

Les mots proposés aux enseignants-stagiaires pendant cette tâche correspondent à des objets *de la physique* : nous ne remarquons pas de prise en considération explicite des autres domaines scientifiques.

Tâche 7 : « Analyse quantitative de situations »

Déroulement

Deux objectifs sont associés à la résolution de cette tâche :

- « S'approprier le modèle
- Aller vers une approche quantitative »

Dans cette partie du stage de formation, les enseignants-stagiaires sont amenés à appliquer le modèle *système stock transfert* à différentes situations expérimentales (Figure 112), en procédant à une analyse énergétique et en posant un bilan énergétique. L'accent est mis sur le caractère expérimental des manipulations proposées (quel matériel, quels branchements, etc.)

- Manip préliminaire : la puissance d'une ampoule
- Manip 1 : bouilloire
- Manip 2 : alternateur manuel avec poulie
- Manip 3 : liseuse avec batterie externe
- Manip d'ouverture : lampe à alcool sur balance

Figure 112: diapositive présentant les "manips" évoquées pendant la tâche 7

L'expérience préliminaire est intitulée « mesure de la puissance électrique – LED versus lampe à incandescence ». Ici, il s'agit de montrer aux enseignants-stagiaires quel dispositif utiliser pour mesurer la puissance électrique fournie à un appareil branché sur le secteur. Des photographies d'un

montage expérimental permettant de répondre à cette question sont présentées aux enseignants-stagiaires et commentées par F2C et F2A. Ce montage met en jeu deux lampes (à utiliser à tour de rôle), une pince ampèremétrique et un wattmètre.

Trois autres situations sont alors présentées aux enseignants-stagiaires, à l'aide des diapositives reproduites ci-après (Figure 113, Figure 114, Figure 115).

Manip 1 : Bouilloire

On fait bouillir
1L d'eau
initialement à
20°C,
à l'aide d'un
thermoplongeur



Rendement
du dispositif
?

Figure 113: diapositive présentant la "manip 1" (tâche 7)

Manip 2 : liseuse USB avec batterie externe

On branche une
liseuse USB à une
batterie externe
pleine.
On laisse la lampe
allumée



Autonomie
de la lampe
?

Figure 114: diapositive présentant la "manip 2" (tâche 7)

Manip 3 : l'alternateur manuel « quantifié »

On branche un
générateur manuel
à une lampe.



Rendement
du dispositif
?

Figure 115: diapositive présentant la "manip 3" (tâche 7)

Les consignes données pour le travail de groupe, d'une durée de 25 minutes, sont reproduites à la Figure 116.

Pour chaque manip :

- Mener une analyse énergétique ;
- Imaginer un dispositif expérimental permettant de répondre à la question posée ;
- A l'aide de la vidéo de manip proposée, répondre à la question posée ;

Figure 116: consigne associée à la tâche 7

Chacun des trois groupes traite une des trois situations (durée du travail de groupe : 25 minutes). Les valeurs expérimentales permettant de répondre aux questions posées sont données dans les vidéos de présentation des différentes expériences.

La mise en commun des propositions effectuées par les différents groupes n'a pas été enregistrée.

Analyse

Nous disposons de peu d'éléments permettant de proposer une analyse pertinente de cette partie de la formation, dans laquelle les enseignants-stagiaires ont été amenés à avoir une activité de modélisation.

Nous remarquons que les situations proposées ne concernent que peu de domaines scientifiques, et se centrent sur la physique – en particulier, sur l'électrocinétique et la thermique.

Tâche 8 : élaboration de ressources

En fin de matinée, F2B présente la tâche qui sera proposée aux enseignants-stagiaires pendant l'après-midi, qui vise à la production de ressources : soit une séquence d'enseignement, soit une progression (Figure 117 ; « objectifs en termes de compétences »).

Production	
Construire une Séquence	Réfléchir à une progression
Activité expérimentale Activité langage courant et langage scientifique Activité langage Math Activité chaîne d'énergie	montrer l'évolution sur plusieurs classes par : situations, niveau de classe → chaîne d'E, 1er principe

Figure 117: diapositive de présentation de la tâche 8 - "Production"

Les enseignants-stagiaires sont invités à construire des séquences d'enseignement et des progressions sur des thèmes spécifiques (« objectifs en terme de savoirs »), en lien soit :

- avec un domaine de la physique (l'électricité, la thermodynamique ou la mécanique) ;
- avec la conservation de l'énergie ;
- avec la puissance.

Sur quoi ? (Objectif en termes de savoirs)

En lien avec le concept de l'énergie,

- Electricité : les concepts et les tensions,
- Thermodynamique : les concepts et les tensions
- Mécanique : les concepts et les tensions (obstacles cognitifs)
- Conservation de l'énergie : les concepts et les tensions
- leur place dans les programmes
- la mathématisation de la chaîne d'énergie et le premier principe

Figure 118: diapositive de présentation de la tâche 8 - « Objectifs en terme de savoirs »

F2B présente la chaîne énergétique comme le seul élément incontournable à prendre en considération. Il n'évoque pas les « pertes » d'énergie, malgré l'expression « mettre les pertes », qui figure sur la diapositive support (Figure 119).

Objectif en termes de savoir-faire

- Toujours faire faire aux élèves une chaîne d'énergie dans un exercice sur l'énergie (mettre les pertes)

Figure 119: diapositive de présentation de la tâche 8 - « Objectifs en termes de savoir-faire »

Chaque enseignant-stagiaire est invité à choisir un type de production (séquence / progression) et un thème, afin de constituer des groupes de travail.

Le travail de groupe dure environ une heure et est suivi d'une mise en commun des productions à destination de l'ensemble des enseignants-stagiaires et formateurs.

La mise en œuvre de cette tâche n'a pas été transcrite : elle repose sur un travail des enseignants-stagiaires, qui ne sera que partiellement commenté par les formateurs, sans lien direct avec nos questions de recherche.

Cependant, la consigne donnée aux enseignants-stagiaires confirme certaines de nos analyses : le modèle scientifique scolaire de l'énergie proposé pendant la formation est indissociable des chaînes d'énergie, et la seule caractéristique de l'énergie mise en avant est sa conservation. L'énergie est présentée comme un concept transversal *de la physique* (aucune mention de la technologie, des SVT ou de la chimie dans les thèmes proposés).

Clôture de la formation

Les formateurs proposent un bilan final de la formation, en évoquant en particulier les questions restées ouvertes et les limites des chaînes qu'ils proposent. Nous avons retranscrit cette partie de la formation.

15.2. Modèle scientifique scolaire de l'énergie proposé pendant la formation

Dans cette section, nous décrivons le modèle scientifique scolaire de l'énergie proposé par les formateurs pendant la formation. Certains éléments de ce modèle ont déjà été mis en évidence dans la section précédente, en particulier les formes d'énergie et ses différents modes de transfert, ainsi que les règles qui régissent l'élaboration des chaînes énergétiques.

Qu'est-ce que l'énergie ?

Les formateurs s'accordent à ne pas proposer de définition pour l'énergie :

« juste pour rebondir sur // ce que disait F2B énergie c'est comme électricité enfin bon en tout cas pour nous hein / nous quatre dans le groupe / c'est un terme fourre-tout // (*elle rit*) quand on dit énergie d'où ces précisions » (F2D, F2-4, 54-56)

Ils ne la présentent pas comme une grandeur physique ou un invariant mathématique, mais plutôt comme un concept, dont les différents éléments figurent sur la carte conceptuelle qu'ils ont conçue :

« ne pas envisager l'énergie comme une définition mais comme un concept protéiforme » (F2B, F2-4, 36)

De gauche à droite :

- L'énergie : ce n'est pas une définition, mais tout ça
- des situations réelles vers un concept protéiforme

Figure 120: élément guidant la lecture de la carte conceptuelle

Ce concept relie entre eux différents domaines scientifiques. Pendant la formation, les domaines scientifiques pris en considération sont exclusivement ceux de la physique (électrocinétique, thermique, mécanique) (voir section précédente).

La place du langage courant par rapport au langage scientifique est centrale pendant ce stage de formation. Pour F2A, les mots du langage courant ont un sens sinon identique, du moins suffisamment proche et toujours compatible avec celui qu'ils prennent en sciences. C'est le message essentiel qu'il souhaite faire passer aux enseignants-stagiaires lors de la première tâche ; il revient dessus en fin de stage :

« il est clair en tout cas qu'il y a des mots / comme le mot puissance / qui est un mot finalement qui a du sens indépendamment du cours d'électricité de troisième // et // qu'il est bon de réactiver certainement s'appuyer sur le langage // il faut faire confiance au langage courant / le raffiner un peu si besoin mais il est / il est essentiel pour // la science n'est pas déconnectée du monde réel » (F2A, F2-bilan, 18-22)

F2B et F2C ont un avis plus nuancé sur cette question : s'ils souhaitent un enseignement de l'énergie qui prend appui sur le langage courant, ils évoquent la nécessité de préciser le sens scientifique des mots, en regard de leur sens courant :

« nous on a eu une approche sur le / sur le vocabulaire // et // et le langage courant // c'est // pourquoi ça parce que c'est vraiment / des concepts où les élèves ils arrivent avec beaucoup de représentations // c'est-à-dire que l'énergie ça fait partie de leur vie // en terme de mot // et donc en fait il y a des représentations des misconceptions il y a beaucoup de choses à déconstruire aussi chez les élèves // d'où l'intérêt en fait d'aller

chercher leurs représentations / le vocabulaire qu'ils mettent initialement / avant d'aller essayer de / de reconstruire autre chose avec eux » (F2B, F2-bilan, 29-35)

Caractéristiques de l'énergie

Définition des systèmes

Le modèle proposé repose en grande partie sur la définition des systèmes (« système-stock-transfert »), jugée importante par les formateurs :

« nous on va commencer à vous amener vers une réflexion en terme de systèmes // de stocks / et de transferts » (F2C, F2-2, 14-15)

« nous pensons que raisonner en terme de systèmes stocks et transferts / ça va être un super levier pour / pour lever des malentendus » (F2C, F2-2, 39-41)

« si on se met à raisonner en stocks systèmes transferts / eh bien ça clarifie » (F2C, F2-2, 72-73)

« la force (...) de raisonner en système stock transfert // qui permet de clarifier » (F2C, F2-2, 79-81)

Cependant, ils ne précisent pas comment choisir les systèmes de départ, comme le montrent de nombreuses citations parmi lesquelles :

« là le système qui va être intéressant là-dessus c'est // c'est le / c'est l'équivalent du piston c'est cette // la canette » (F2C, F2-2, 15-16)

« parce qu'on voit que si on prend le système / le système condensateur / eh bien il y a / il a son énergie électrique qui diminue » (F2C, F2-2, 73-74)

« si on regarde où sont les systèmes (...) / bah on a un stock d'énergie chimique » (F2C, F2-2, 96-96)

Les systèmes à mettre en relation les uns avec les autres ne sont pas non plus clairement identifiables (voir dans la section précédente, analyse du moteur solaire et de la chute).

D'une façon générale, les systèmes sont identifiés à des objets :

« donc / tout part des systèmes // dans notre vie c'est des objets »

Le découpage proposé pour l'identification des systèmes nous laisse supposer que les objets en question sont des solides, dont la délimitation des contours a peu d'importance (voir par exemple la bouilloire, Figure 99, et le moteur, Figure 98). Le fait que l'« air » (Figure 102) ne soit pas considéré comme un système comme les autres est cohérent avec cela – mais n'est pas en accord avec le sens que la physique donne à ce concept.

Formes d'énergie

Dans le modèle « système-stock-transfert », les stocks d'énergie peuvent être identifiés à des formes d'énergie : alors, plusieurs « stocks » sont associés au système.

Les formateurs proposent plusieurs classifications pour les formes d'énergie, dans la carte conceptuelle que nous avons décrite à la section précédente (tâche 4) :

- l'énergie mécanique, macroscopique et l'énergie interne, microscopique ;
- l'énergie cinétique globale et l'« énergie potentielle d'interaction externe (reliée à trois autres formes d'énergie : potentielle gravitationnelle, potentielle élastique et potentielle électromagnétique), qui forment l'énergie mécanique, ainsi que les énergies potentielle d'interaction, de masse et cinétique microscopique, qui forment l'énergie interne.

Ces classifications sont proches de celles couramment proposées en sciences (chap.2), cependant les formateurs ne les définissent pas. Ils ne proposent pas de classification des formes d'énergie spécifique pour l'enseignement, et ne questionnent pas le sens général de ce qu'est une forme d'énergie.

Transferts d'énergie

Une liste de transferts d'énergie figure également sur la carte conceptuelle :

- « rayonnement » ;
- « transfert électrique : travail électrique » ;
- « transfert mécanique : travail d'une force » ;
- « transfert thermique ».

Nous remarquons que le « travail électrique » n'est pas considéré comme le travail *d'une force*, exclusivement associé à la mécanique.

D'après les formateurs – et en particulier F2B, qui présente les chaînes énergétiques – les transferts peuvent être extérieurs aux systèmes (entre systèmes) ou internes (intra-système). Cette considération va à l'encontre du sens donné aux transferts d'énergie en physique (chap.2 ; §3.1), et de la liste de transferts proposée.

Au cours du stage de formation, le sens donné à l'expression « transfert thermique » et aux expressions liées aux phénomènes électriques a été discuté, en particulier en début de stage (tâche 2), mais n'a pas donné lieu à des définitions claires et consensuelles.

Énergie électrique, transfert électrique et électricité

F2C explique la distinction entre énergie électrique et transfert électrique (Figure 121) – l'énergie électrique est une forme d'énergie, associée à un stock :

« l'énergie électrique / c'est lié à un stock d'énergie une forme d'énergie » (F2C, F2-1, 67-68)

« si on regarde l'énergie électrique stockée // bah ça correspond // pas à beaucoup de choses hein on est sur des condensateurs / et les orages / qui sont des formes de condensateurs à l'échelle de la nature » (F2C, F2-1, 63-65)

Il identifie l'électricité au transfert électrique :

« là l'électricité c'est / très clairement voilà ce le déplacement des électrons le long des fils // c'est ça // et ce déplacement d'électrons dans les fils n'est pas / ce n'est pas un stockage d'une énergie en soi mais c'est bien un transfert / d'énergie électrique » (F2C, F2-1, 108-111)

**L'énergie électrique stockée correspond aux condensateurs et aux orages.
Sinon, ce n'est pas de l'énergie électrique.**

**Le terme "énergie électrique" est ambigu :
il suggère une forme d'énergie alors qu'il s'agit la plupart du temps, d'un type de transfert.**

***Importance de raisonner en :
systèmes, stocks et transferts***

Figure 121: diapositive partagée – tâche 2

Selon F2C, utiliser un modèle qui distingue les stocks d'énergie (rarement électriques) et les transferts (potentiellement électriques) permet de lever les ambiguïtés (Figure 121).

Il identifie l'électricité à la fois à un *transfert* et à une *transmission* d'énergie (Figure 122).

**L'électricité est un intermédiaire,
un transmetteur d'énergie,
ni une source d'énergie,
ni un stock d'énergie.**

***Importance de raisonner en :
systèmes, stocks et transferts***

Figure 122: diapositive partagée – tâche 2

Pendant que F2C explique ces différences, une discussion a lieu par écrit¹³⁷ entre des enseignants-stagiaires, F2A et F2C ; nous l'avons reproduite ci-après :

137 Dans la boîte de dialogue du logiciel de vidéoconférence.

S : Mais le condensateur et l'orage, c'est de l'électrostatique. Ce n'est pas du stockage d'énergie électrique, mais électrostatique.

F2A : oui, mais c'est donc de l'énergie électrique stockée comme dans un (super)condensateur.

F2B : oui et non. Dès qu'il y a un courant, on va parler électromagnétisme. Par contre effectivement, avant transfert, purement électrostatique.

S : Un condensateur, c'est un stockage électrostatique. L'orage, c'est pareil. Le stockage électrique n'est pas possible.

F2B : qu'entendez-vous par "électrique" dans ce cas ?

S : C'est un ensemble de particules chargées qui ont un mouvement d'ensemble

F2B : Pour moi il y a des questions de choix de voc, notamment dans un contexte étude énergétique

S1 : qu'appelle-t-on alors source d'énergie ?

F2B : mais je suis d'accord "énergie électrique" est plutôt à éviter. On en reparle cet après-midi autour d'une image plus complète de l'électromagnétisme

F2A : pas de stock d'énergie électrique en général, mais du transfert électrique : au passage de l'obstacle (lampe, moteur), les charges chutent en potentiel

Nous retrouvons ici une des thématiques non consensuelles couramment discutée en didactique, liée à la catégorisation et à la dénomination des formes d'énergie. Les formateurs présentent un discours globalement cohérent, dans lequel l'énergie électrique – ou électrostatique – est associée à des systèmes ayant un potentiel électrique non-nul. Cependant, F2A précise qu'un dipôle électrique en fonctionnement possède, selon lui, une énergie électrique. F2B et F2C n'envisagent pas cette possibilité, et F2D ne se prononce pas sur cette question.

La question des régimes transitoires ou stationnaires n'est pas évoquée. Pourtant, lorsqu'un dipôle est en fonctionnement en régime stationnaire, l'énergie que lui confère son écart de potentiel est, en moyenne, constante au cours du temps, et sa prise en considération – ou non – n'a pas d'impact sur l'analyse énergétique de la situation.

Chaleur, transfert thermique

En début de formation (tâche 2), F2B discute du sens que prend le mot chaleur. Selon lui, « aujourd'hui, scientifiquement, le mot "chaleur" signifie "transfert thermique" » (Figure 123).

Le mot chaleur recouvre des significations très variés dans son usage quotidien : sensations, source, transfert, température ("fortes chaleurs").

Aujourd'hui, scientifiquement, le mot "chaleur" signifie "transfert thermique".

Importance de raisonner en : systèmes, stocks et transferts

Figure 123: diapositive partagée – tâche 2

Il définit donc le mot *chaleur* par rapport à l'expression *transfert thermique* :

« ce qui est au centre c'est cette idée de chaleur parce que si vous regardez le mot chaleur // alors là qui a été extrêmement répandu dans le quotidien / eh bien il renvoie à des choses très variées // à l'idée de sensation bien sûr // chaud froid plus ou moins de chaleur j'ai besoin de chaleur / l'idée de source aussi / une source de chaleur / l'idée de transfert / hein un transfert de chaleur / et puis même l'idée de température voilà oh là une période de forte chaleur // et donc là / c'est un mot extrêmement chargé extrêmement polysémique / sauf que bah du coup ça renvoie à des choses qui parfois n'ont rien à voir // enfin // rien à voir / qui sont vraiment différentes / là / alors si on regarde l'acceptation scientifique aujourd'hui / aujourd'hui / chaleur signifie transfert thermique // voilà // et // et ce n'est pas parce que la science le décrète que / après dans l'usage qu'en font les élèves et les / tout le monde et même les enseignants // que c'est // c'est clair » (F2C, F2-2, 30-39)

Or, la *chaleur* est un concept de la physique, relativement stabilisé (§2.1, §2.3) – à l'inverse de l'expression « transfert thermique », apparue récemment dans l'enseignement (§2.1, note n°17). Définir un concept stabilisé de la physique par un nouveau concept spécifique à l'enseignement pose question.

En fin de stage, F2C aborde à nouveau ce sujet : parmi les « questions ouvertes » relatives au « modèle SST », il pose la question :

« énergie thermique = transfert d'énergie thermique = transfert thermique d'énergie ? »
(F2C, F2-bilan)

Il précise qu'il s'agit d'un sujet de discussions encore en cours entre les formateurs, qui demande réflexion, et qu'il n'a pas de réponse à cette question, tandis que F2A et F2B ont un avis tranché et opposé (qu'ils n'exposent pas aux enseignants-stagiaires) (F2-bilan, 64-73).

Conversions et transformations d'énergie

Les formateurs n'utilisent pas le terme « conversion », jugé peu précis et problématique ; ils précisent qu'il s'agit d'un choix réfléchi (F2B, F2-3, 63-67).

Dans l'ensemble du texte transcrit, il n'apparaît qu'à une reprise¹³⁸ (deux fois de suite), lorsque F2C explique pourquoi la notion de convertisseur ne fait pas non plus partie de ce modèle.

Les transformations de l'énergie ne sont pas mentionnées en tant que telles mais sont évoquées à plusieurs reprises, dans les questions qui portent sur la chute libre ou avec frottements. Elles sont présentées comme des transferts d'énergie internes aux systèmes (voir ci-avant, *transferts*).

Conservation de l'énergie

La conservation de l'énergie est mentionnée à de nombreuses reprises, et est au cœur de plusieurs tâches (en particulier de la tâche 5).

Elle est présentée de façon fonctionnelle et mathématique, en lien avec la résolution d'exercices et de problèmes, qui se déroule en suivant une méthodologie de résolution clairement explicitée par F2B. Nous avons remarqué (§15.1) que la conservation de l'énergie n'y est pas présentée

138 On compte une autre occurrence, dans les propos tenus par un enseignant-stagiaire.

explicitement comme ayant lieu *au cours du temps*, cependant, le bilan de fin de stage (Figure 124) mentionne l'importance de définir une plage de temps pour pouvoir appliquer le principe de conservation de l'énergie.

- le modèle SST consiste à découper dans le réel des systèmes qui échangent différentes formes d'énergie, entre eux et avec l'extérieur (transferts), et qui peuvent éventuellement stocker/destocker de l'énergie
- le modèle SST permet d'appliquer simplement le principe de conservation de l'énergie, pour chaque système ou sous-système considéré, quelle que soit l'échelle.
- Le modèle SST est bien adapté à une quantification de l'énergie, à condition de bien préciser la plage de temps considérée.

Figure 124: « bilan sur le modèle SST » (F2-bilan)

Dégradation de l'énergie

La question de la dégradation est présentée comme ouverte (F2-bilan, « questions ouvertes ») par les formateurs :

« c'est la question des pertes / qui est assez récurrente // est-ce que le mot pertes est vraiment / utile et pertinent / est-ce que si on se limite //aux transferts qu'on connaît on a juste / un échange d'énergie par transfert thermique / vers l'environnement // l'environnement peut être ici du coup considéré comme un système à part entière / qu'on peut représenter de la même façon // avec un stock d'énergie qui augmente // et on n'a pas forcément besoin de savoir quel est ce stock d'énergie » (F2B, F2-3, 91-94)

« aujourd'hui on s'interroge sur comment représenter / les formes d'énergie qui relèvent de dissipation alors est-ce que c'est énergie utile énergie non utile // voilà // voilà on teste des formats des symboles » (F2C, F2-bilan, 43-45)

Sa représentation sur les chaînes énergétique n'est, par ailleurs, pas stabilisée (par exemple, voir Figure 99, Figure 100, Figure 102).

Chaînes énergétiques

Les chaînes énergétiques sont présentées comme l'élément majeur du modèle scientifique scolaire de l'énergie promu par les formateurs (Figure 119).

Dans la section précédente, nous avons procédé à une analyse globale des chaînes énergétiques présentées par les formateurs pendant l'ensemble du stage de formation.

Les règles de représentation proposées sont succinctes (Figure 97) et comportent les limites mises en évidence dans la description des caractéristiques de l'énergie.

En particulier, la définition des systèmes n'est pas clarifiée (F2-2, 70-74), ce qui engendre des incohérences dans les représentations proposées (comme l'énergie associée à l'hélice du moteur solaire – Figure 98 – et la question du rôle de la Terre dans les chutes). Les transferts ne prennent

pas le sens que leur donne habituellement la physique. Les « stocks », représentés dans les systèmes, peuvent *a priori* prendre le nom de formes d'énergie, bien que cela ne soit jamais clairement explicité.

F2C évoque certaines limites que comportent la plupart des chaînes généralement utilisées dans l'enseignement :

« on risque de créer des misconceptions chez les élèves // et qui créent par exemple une confusion entre le concept de système et le concept de forme d'énergie // c'est-à-dire par exemple les élèves on voit souvent qu'ils pensent que les systèmes n'ont qu'un seul / comptent qu'une seule forme d'énergie qu'un seul stock d'énergie // ce qui peut entraîner des erreurs de représentation » (F2B, F2-3, 33-37)

« et puis on a des flèches qui vont vers rien // donc là il y a encore quelque chose à clarifier / qu'est-ce qu'on met / qu'est-ce qu'on veut représenter c'est quoi l'idée d'échange d'énergie qu'on veut faire représenter chez les élèves / et // ce truc là les flèches qui vont vers rien ou qui ne partent de rien // est-ce que l'idée de création ou de disparition // est possible / est-ce qu'on ne risque pas de créer cette / cette misconception chez les élèves » (F2B, F2-3, 44-49)

Les chaînes « système-stock-transfert » permettent d'éviter ces erreurs : la représentation de plusieurs « stocks » dans chaque système met en évidence la multiplicité des formes d'énergie (bien que la plupart des systèmes représentés au cours de la formation ne comportent qu'un « stock »), et les chaînes commencent et terminent, le plus souvent, par un système (bien que l'air / environnement ne soit pas représenté comme les autres systèmes).

Comme vu lors de l'analyse de la tâche 3, les limites dues à la représentation choisie ne sont pas énoncées par les formateurs ; il s'agit de :

- la substantialisation de l'énergie, appuyée par l'utilisation du terme « stock » et sa représentation par des rectangles ;
- l'idée d'une quantification de l'énergie « connue » et identique pour l'ensemble des systèmes, associée à la hauteur des bâtons ;
- le raisonnement linéaire causal, commun à l'ensemble des chaînes énergétiques.

Utilisation des chaînes énergétiques

Les chaînes énergétiques proposées pendant la formation répondent à deux types de questions : des questions représentatives (tâche 3) et des questions d'application du principe de conservation de l'énergie, où elles servent de support visuel (tâche 5).

Les formateurs soulignent que l'utilisation des chaînes en vue de faire des calculs est destinée uniquement à des élèves de lycée :

« ça on ne le ferait pas au collège // du coup comme / comme on n'a plus l'habitude de le faire au collège alors on a un peu oublié ce qui était attendu au lycée // donc il y a aussi cette idée de projection dans / dans le futur avec les élèves » (F2B, F2-5, 8-11)

15.3. Conclusion

La stratégie de formation utilisée par les formateurs repose sur le schéma suivant :

- mise en activité des enseignants-stagiaires en groupes, en présence d'un formateur qui ne doit pas *a priori* les aider à résoudre la tâche demandée ;
- restitution des travaux de groupe au collectif – sans intervention des formateurs ;
- proposition de correction par un formateur, en appui sur le modèle « système-stock-transfert » (dès la tâche n°3).

L'ordre dans lequel les tâches ont été proposées suit, *a priori*, une logique progressive comparable à celle attendue dans l'enseignement par les formateurs : le stage commence par des considérations relatives au lien entre le vocabulaire courant et le vocabulaire scientifique, continue par la présentation du modèle, avant d'aboutir à une application du modèle sur des situations concrètes, d'abord qualitatives (niveau collège), puis quantitatives (niveau lycée).

Nous avons retranscrit l'ensemble des discours et discussions impliquant les formateurs (hors travail de groupe), mettant en jeu des chaînes énergétiques et/ou pendant lesquels l'énergie a été abordée, sous un angle scientifique ou scientifique scolaire. La très grande majorité de ces propos ont été tenus par F2B et, dans une moindre mesure, F2C.

Les formateurs ont proposé un modèle de l'énergie, dont nous avons mis en évidence que les éléments n'ont pas été clairement définis (formes d'énergie, transferts d'énergie, systèmes). Nous n'avons pas relevé de différences de conception de l'énergie entre les formateurs, cependant, nous avons remarqué un grand nombre d'incohérences dans la manière dont le modèle proposé est utilisé par les formateurs, en particulier dans sa représentation sous la forme de chaînes énergétiques : le modèle *effectif* diffère du modèle *initial*.

Bien que nous ne l'ayons pas transcrit dans son intégralité, nous avons procédé à une écoute de l'ensemble du stage de formation (hors travaux de groupe). Les difficultés des élèves et les difficultés des enseignants liées à l'enseignement et à l'apprentissage de l'énergie ont été marginalement évoquées par les formateurs :

- F2B a montré qu'il n'existe pas de norme concernant les chaînes énergétiques ;
- F2B a évoqué les confusions possibles entre systèmes et formes d'énergie ;
- F2B et F2C ont mis en évidence la polysémie de certains mots, qui appartiennent à la fois au langage courant et au langage scientifique, qu'ils ont présentée comme un levier pour les apprentissages.

Le modèle proposé comporte une méthodologie de résolution d'exercices mettant en jeu la conservation de l'énergie et l'écriture de bilans énergétiques, qui peut être associée à la représentation d'une portion de la chaîne énergétique – soit un seul système, sa variation d'énergie interne et les transferts qu'il reçoit et qu'il effectue, soit l'ensemble des systèmes considérés et leurs variations d'énergie internes, qui forment un ensemble isolé.

Bien que le stage soit destiné à des enseignants de toutes disciplines scientifiques, le modèle proposé est un modèle *de la physique*, ce que soulignent les choix de situations proposées aux enseignants-stagiaires, très majoritairement dans les domaines de l'électrocinétique, de la thermique, voire de la mécanique.

Les formateurs considèrent que le modèle qu'ils proposent est stable, bien qu'il puisse être amené à évoluer, notamment en prenant en compte la dégradation de l'énergie – quasiment absente du modèle présenté pendant ce stage de formation.

Analyse croisée des chapitres 14 et 15

Un ou plusieurs modèles scientifiques scolaires de l'énergie ?

L'analyse du discours des formateurs pendant les entretiens a mis en évidence la coexistence de deux modèles scientifiques scolaires de l'énergie, l'un, porté par F2A, l'autre, par F2B et F2C. Dans ces deux modèles, l'énergie est un concept unificateur *de la physique – et de la chimie*. Ces modèles diffèrent essentiellement sur deux aspects :

- F2B et F2C considèrent que les formes d'énergie sont nécessairement associées à des systèmes, et, de ce fait, que l'énergie électrique n'existe pas, alors que l'énergie électrique fait partie du modèle de F2A ;

- F2B et F2C associent à leur modèle de chaînes énergétiques, que F2A juge peu claires, inutiles et potentiellement sources d'erreur.

Le modèle qui a été promu pendant la formation est celui de F2B et F2C : les chaînes énergétiques ont été largement mises en avant, et l'énergie électrique a été présentée comme une expression menant à des erreurs de compréhension des phénomènes énergétiques.

Ce modèle repose sur la distinction entre systèmes, stocks d'énergie et transferts d'énergie. Les systèmes contiennent de l'énergie, représentée sous forme de stocks. Les modifications (au sens large) des stocks d'énergie sont dues à des transferts, représentés par des flèches, qui peuvent figurer entre systèmes ou à l'intérieur des systèmes – de ce fait, ils ne prennent pas le même sens que celui qui leur est donné en sciences, et dans l'enseignement.

Nous n'avons pas identifié les raisons qui expliquent que ce soit ce modèle qui ait été mis en avant pendant la formation.

Logiques d'action et formation

Nous n'avons pas pu clairement identifier de logiques d'action communes aux formateurs qui justifient leurs pratiques de formation dans leur ensemble. L'analyse des pratiques déclarées et effectives de formation a mis en évidence que le stage de formation F2 a été préparé et animé par une somme de formateurs plutôt que par un collectif de formation :

- F2A propose et anime en partie les épisodes du stage de formation qui mettent en jeu des expérimentations, qu'il considère comme fondamentales pour faire apprendre l'énergie – voire la physique – aux élèves, et regrette de ne pas avoir animé certaines parties théoriques de la formation ;

- F2B et, dans une moindre mesure, F2C proposent et animent les épisodes du stage de formation qui mettent en jeu des chaînes énergétiques, représentées selon la méthodologie qu'ils promeuvent, et dans laquelle F2A ne se retrouve pas.

Cette absence de logiques d'action communes à l'ensemble des formateurs s'explique essentiellement par deux raisons :

- d'une part, la coexistence de deux modèles scientifiques scolaires de l'énergie, portés pour l'un par F2A, pour l'autre par F2B et F2C ;

- d'autre part, une organisation et une répartition du travail entre formateurs selon les envies de chacun, mais sans cohérence globale – à la fois en amont de la formation et pendant la formation.

L'ensemble des formateurs proposent un enseignement de l'énergie qui prend appui sur le vocabulaire courant. Pour F2A, ce vocabulaire fait partie du modèle, tandis que, pour F2B et F2C, il doit être mis en regard du vocabulaire scientifique. La première tâche, proposée par F2A, présente le vocabulaire de la vie quotidienne comme compatible avec et très proche du vocabulaire scientifique. Cependant, dès l'introduction de la deuxième tâche, F2C sépare clairement le vocabulaire courant du vocabulaire scientifique.

Les chaînes énergétiques ont été présentées par F2B, selon une méthodologie que F2A ne partage pas. Les règles qui permettent de représenter ces chaînes ne sont pas clairement définies, tout comme la plupart des éléments du modèle : les formes d'énergie et les transferts d'énergie sont nommés, sans être explicités et/ou mis en relation les uns avec les autres. Nous avons aussi mis en évidence que l'identification des systèmes qui composent les chaînes pose question. Selon nous, le choix fait par les formateurs de ne pas présenter de formalisme clair, notamment dans le diaporama utilisé, s'explique par une absence de consensus entre formateurs en amont de la formation, et par une assimilation partielle du modèle par les formateurs, comme en témoigne les incohérences mises en évidence sur certaines chaînes.

La stratégie de formation utilisée donne une large place aux enseignants-stagiaires, qui sont mis en activité pendant des périodes longues. Les travaux de groupe donnent lieu à des mises en commun et les échanges entre enseignants sont favorisés. Les formateurs ne prennent pas part à ces discussions, mais proposent une « correction », qui met en jeu le modèle et les chaînes énergétiques que F2B et F2C promeuvent. Ce modèle et ces chaînes sont présentés comme particulièrement efficaces, mais ne sont pas directement mis en regard des propositions des enseignants-stagiaires.

Par ailleurs, nous avons remarqué que les formateurs ne font presque jamais mention de contraintes institutionnelles, et, d'une façon plus générale, n'évoquent pas d'éléments institutionnels : le programme n'est pas évoqué, les exemples de chaînes énergétiques partagées sont issues d'Internet, tout comme la définition proposée pour le convertisseur. De la même manière, le modèle qu'ils proposent est présenté comme une construction autonome du groupe – ou de F2C – sans liens avec des travaux de recherche ou avec des modèles pré-existants. Nous faisons l'hypothèse que cette absence de référence institutionnelle peut être due à la présence d'un inspecteur et d'une formatrice de l'INSPÉ dans le GRC-F2, qui ont l'habitude d'être considérés eux-mêmes comme garants de l'institution.

Questions encore ouvertes

Le modèle qui a été promu pendant le stage de formation est un modèle scientifique scolaire de l'énergie *de la physique* : il prend appui sur les caractéristiques de transfert de l'énergie et sur les formes d'énergie *de la physique*, et est appliqué à des domaines *de la physique* – essentiellement, à l'électrocinétique et à la thermique. La mathématisation qui lui est associée, en lien avec le principe de conservation de l'énergie, met en jeu des savoirs-faire *de la physique*, associés à un niveau scolaire de lycée. Cependant, le stage de formation est ouvert aux enseignants de physique-chimie, de technologie et de SVT, qui enseignent en collège, en lycée général et technologique, et en lycée

professionnel. Par ailleurs, pendant l'ensemble du stage de formation, la question des enjeux sociétaux liés à l'énergie n'a pas été évoquée.

Nous n'avons pas identifié les raisons pour lesquelles les formateurs promeuvent un modèle *de la physique* à un public non spécialiste, sans adaptation particulière, au sein d'un stage supposé traiter de l'énergie sous l'angle de l'interdisciplinarité.

16. L'énergie vue par les formateurs F1A, F1B, F1C – analyse de pratiques déclarées

16.1. Quels formateurs, quelle formation ?

Le stage de formation relatif à l'enseignement de l'énergie F1 proposé en 2021-2022 avait déjà eu lieu auparavant à trois reprises, la première fois pendant l'année scolaire 2018-2019, puis, pour répondre à une forte demande, deux fois pendant l'année scolaire 2019-2020. Il n'a pas pu avoir lieu l'année suivante du fait des restrictions liées à la situation sanitaire (Covid-19). Il est à destination d'enseignants de collège.

F1A, F1B et F1C appartiennent au même groupe de recherche collaborative, au sein duquel se réunissent des chercheurs en didactique et des enseignants. Par la suite, ce groupe sera noté « GRC-F1 ».

Dans cette partie, nous commencerons par décrire l'expérience professionnelle de chacun des formateurs, puis nous évoquerons la genèse de cette formation dont nous donnerons la structure prévue.

Présentation des formateurs

F1A a eu le CAPES en 1998 et enseigne la physique-chimie en collège depuis plus de vingt ans (F1A, 24 ; 27-28), pour tous les niveaux scolaires. L'année de notre entretien, elle avait des classes de 5^e, de 4^e et de 3^e (F1A, 32-34). Elle a une grande expérience dans l'enseignement auprès d'élèves à besoins spécifiques : elle a enseigné en SEGPA¹³⁹, en ULIS¹⁴⁰, en FLE¹⁴¹ et en EPM¹⁴² (F1A, 16-20 ; 30-31). Elle a également des responsabilités au sein de l'UdPPC (F1, 50-55). Bien que n'ayant pas de qualification particulière pour être formatrice, elle anime des formations académiques depuis douze ans (F1A, 2-8 ; 12-14).

F1B enseigne en lycée depuis 2000 (F1B, 2-5 ; 37-38). Il dispense des formations à destination d'enseignants du secondaire depuis 1997 (F1B, 2-5 ; 23-24) et a suivi quelques formations de formateurs (F1B, 20-21). Il a notamment commencé la formation CAFFA, sur conseil de l'inspection académique. Ce certificat ne lui étant pas nécessaire pour pouvoir continuer à dispenser des formations, il n'a pas achevé sa passation (F1B, 12-18). Il a également donné des cours au sein d'une ESPÉ¹⁴³ pendant 3 ans (F1B, 54-55). Il a des responsabilités au sein de l'UdPPC (F1B, 67). F1B a une formation en didactique de la physique (thèse soutenue en 2000) (F1B, 2-5) et a publié des articles relatifs à l'enseignement de l'énergie (F1B, 124-125), qui reprennent et adaptent les chaînes énergétiques initialement proposées par l'équipe COAST (§4.3, p.77). Il participe au GRC-F1 depuis de nombreuses années. En 2010, il a expérimenté une proposition d'enseignement de

139 Sections d'Enseignement Général et Professionnel Adapté, qui accueillent des élèves en grande difficulté scolaire

140 Unités Localisées pour l'Inclusion Scolaire, qui accueillent des élèves en situation de handicap

141 Français Langue Étrangère, qui regroupent des élèves allophones

142 Établissements Pénitentiaires pour Mineurs

143 École Supérieure du Professorat et de l'Éducation (ces structures ont remplacé les IUFM en 2013 avant d'être remplacées par les INSPÉ en 2019)

l'énergie à destination d'élèves de 1^{er}S (F1B, 407-418). Par ailleurs, il a participé à la rédaction des derniers programmes de physique du lycée (F1B, 402-403).

Avant de devenir enseignante, F1C a travaillé en tant qu'ingénieure dans l'industrie pharmaceutique (F1C, 9-10). Elle a obtenu l'agrégation de physique en 2006 (F1C, 30), puis a enseigné deux ans à l'étranger (F1C, 47-48). Elle enseigne à présent dans une cité scolaire, où elle a à la fois des élèves de collège et des élèves de lycée. En ce qui concerne le collège, elle a enseigné la physique-chimie en 5^e, en 4^e et en 3^e. Lors de notre entretien, elle l'enseignait uniquement en 5^e (ainsi qu'en 1^{er} enseignement scientifique et terminale spécialité) (F1C, 32-37). Elle n'a pas de qualification particulière pour être formatrice et n'a pas suivi de formations de formateurs (F1C, 3 ; 5-6 ; 26-28), mais elle a rejoint le GRC-F1 parce qu'elle avait envie de faire de la formation (F1C, 11-13). En 2021-2022, elle est inscrite en master de didactique et son mémoire de recherche porte sur l'énergie (discussion informelle).

Genèse de la formation

Dans cette partie, nous allons montrer de quelle manière et pour quelles raisons le stage de formation F1 a vu le jour. Il est le fruit d'une collaboration entre F1A, F1B et F1C qui l'ont construit ensemble. En particulier, nous avons pu reconstituer les raisons qui ont menée F1A à proposer et à animer une formation sur l'énergie à destination d'enseignants du secondaire.

Sa démarche part d'une contrainte institutionnelle : avant le changement de programmes de 2015, elle n'enseignait pas l'énergie, en dehors de l'énergie mécanique et de l'énergie cinétique (F1A, 82-83). En 2015, le programme introduit les chaînes énergétiques et les propriétés de l'énergie qu'elles représentent en classe de 6^e (F1A, 82-85 ; 93-94) ; le thème de l'énergie devient « très prégnant » (F1A, 75-76). Jusqu'alors, les chaînes et les propriétés de l'énergie n'étaient « pas du tout un questionnement de collège » (F1A, 87).

Dès 2016, la manière dont elle enseigne l'énergie lui pose problème :

« ce que j'enseignais n'était pas tellement de la physique / c'était des mots / c'était des chaînes / il y avait peu de sens / il y avait // des choses qui me paraissaient // non / non rigoureuses dans mon enseignement / donc ça ne m'allait pas » (F1A, 63-65)

et les premières chaînes qu'elle construit ne suivent aucun formalisme :

« je les ai faites sans réfléchir au pourquoi du comment quoi (...) je faisais ça / en // disant pas plus que le rond c'était un convertisseur et encore comme il n'y a pas de norme sur ces chaînes je me suis trouvée à tâtonner mais c'est quoi la norme » (F1A, 91-97) ;
« au départ c'était des mots qui étaient des valises vides // je faisais des choses euh j'assume je vois que / je leur disais c'est un réservoir c'est un convertisseur » (F1A, 106-108)

Une autre contrainte institutionnelle – celle d'avoir un grand nombre d'élèves de 6^e – lui fait prendre conscience que sa manière d'enseigner l'énergie n'est pas efficace : après une année d'enseignement, F1A constate que les élèves de ses six classes de 6^e réussissent « trop bien » les activités du chapitre relatif à l'énergie et que ces activités ne suscitent pas de questionnement chez eux (F1A, 110-117 ; 108).

Alors, elle cherche des outils qui lui permettent d'améliorer ses enseignements, dans un premier temps dans la sphère institutionnelle (manuels scolaires, sites Internet académiques ou de l'Éducation nationale), où elle constate que ce qui n'est pas clair pour elle ne l'est pas non plus dans les documents qu'elle lit (F1A, 101-108). Cette absence de normes la pousse à s'intéresser au thème de l'énergie (F1A, 55-56) sous un angle plus didactique, à lire des « publications » et d'anciens programmes (F1A, 66-77). Elle lit des articles écrits par F1B, qui lui font comprendre que l'énergie, « c'est plus large c'est plus profond que ça c'est plus rigoureux que ce que j'en [faisais] » (F1A, 66-67). F1A adhère au modèle scientifique scolaire de l'énergie que F1B expose dans ses publications, et entre en contact avec F1B pour proposer des pistes d'enseignement de l'énergie pour le collège : elle crée des fiches qu'ils publient sur Internet, notamment des activités en lien avec « des très très vieux programmes qu'on appelait ces leçons de choses » (F1A, 72 ; F1B, 70-74), mais, selon F1A, le site a une trop faible visibilité, ce qui les pousse à proposer un stage de formation sur l'enseignement de l'énergie au collège à l'académie (F1A, 56-61) – selon F1B, ils ont alors suffisamment de matière pour proposer une telle formation (F1B, 74-79). F1A et F1C mettent en œuvre les activités et séquences de cours proposées par le collectif dans leurs classes et les expérimentent afin de les affiner et d'étayer les ressources (F1B, 83-102).

Lorsqu'il est approché par F1A, F1B anime depuis de nombreuses années des stages de formation académiques à destination d'enseignants de lycée qui portent sur l'énergie (F1B, 64-65). Suite à une demande de l'UdPPC, il a également déjà animé une formation sur ce thème à destination d'enseignants de collège, à laquelle F1A a assisté (F1B, 65-69). Il a conçu le stage de formation pour enseignants de collège sur le modèle de celui à destination d'enseignants de lycée, les parties théoriques (« disciplinaire », « épistémologique », « didactique ») des formations « collège » et « lycée » étant très similaires (F1B, 79-81).

F1C, quant à elle, a participé à une formation animée par F1B relative à l'enseignement de l'énergie en 1^{re} S (F1C, 45-46). Peu après, elle est partie travailler à l'étranger, où elle s'est trouvée en difficulté pour enseigner l'énergie, d'une part parce qu'elle n'avait pas de collègues avec qui en discuter (dimension sociale) et d'autre part parce qu'elle avait du mal à conceptualiser l'énergie (F1C, 47-50, en particulier : « je me suis sentie très seule quand il a fallu enseigner / l'énergie en première // et en collège parce que j'avais des choses qui se répétaient parce que c'était pas clair »). Elle a alors pris contact avec F1B, dont elle connaissait l'expertise sur ce sujet (F1C, 50-51). Après avoir été inspectée en 2015 dans une séance de cours qui portait sur les piles électrochimiques, elle a pris conscience de certaines difficultés supplémentaires et a à nouveau contacté F1B pour en discuter (F1C, 56-61). Par la suite, lorsque F1A et F1B ont choisi de monter le stage de formation, F1B a proposé à F1C de rejoindre leur groupe de travail (F1C, 51-53 ; F1B, 84-85).

F1A et F1C ont un parcours similaire : s'étant trouvées en difficulté pour enseigner l'énergie à leurs élèves, elles ont eu connaissance des propositions d'enseignement de F1B qu'elles ont trouvées opportunes, et qui leur ont permis d'aboutir à un enseignement de l'énergie qu'elles jugent efficace. Elles proposent cette formation afin de permettre aux enseignants qui rencontrent les difficultés qu'elles ont connues par le passé de découvrir ce modèle de l'énergie (F1C, 115-120).

Cette formation est le fruit d'un travail collectif, qui, de ce fait, comporte une forte dimension sociale, mais elle est aussi portée par un modèle de l'énergie dont F1B est à l'origine¹⁴⁴, et dont on peut supposer qu'il est le garant.

Le groupe de travail dont font partie les formateurs est un groupe appartenant à un collectif qui réunit des chercheurs en didactique et des enseignants, or, aucun des membres qui le composent n'est chercheur en didactique. F1B, par son expérience en didactique de la physique (en particulier dans le domaine de l'enseignement de l'énergie), tend à tenir le rôle de chercheur au sein du groupe :

« en l'occurrence c'est un peu moi pour cette affaire qui ai joué le rôle de didacticien quoi // pour les collègues de GRC-F1 je suis un peu vu comme le didacticien de service je ne me considère pas comme didacticien mais au regard de mon parcours c'est souvent moi qui / qui joue un peu aussi ce rôle quoi » (F1B, 116-119)

Sur la Figure 125, nous représentons la nature des principaux échanges entre formateurs tels qu'ils nous les ont rapportés. Les flèches rouges et jaunes donnent une *orientation* aux échanges sur le modèle : F1A et F1C posent les questions, et F1B y répond. Les discussions liées à l'organisation du travail dans les classes de collègue (progression, tâches, etc.) ont lieu essentiellement entre F1A et F1C, qui proposent, expérimentent et ajustent des propositions « didactiques ».

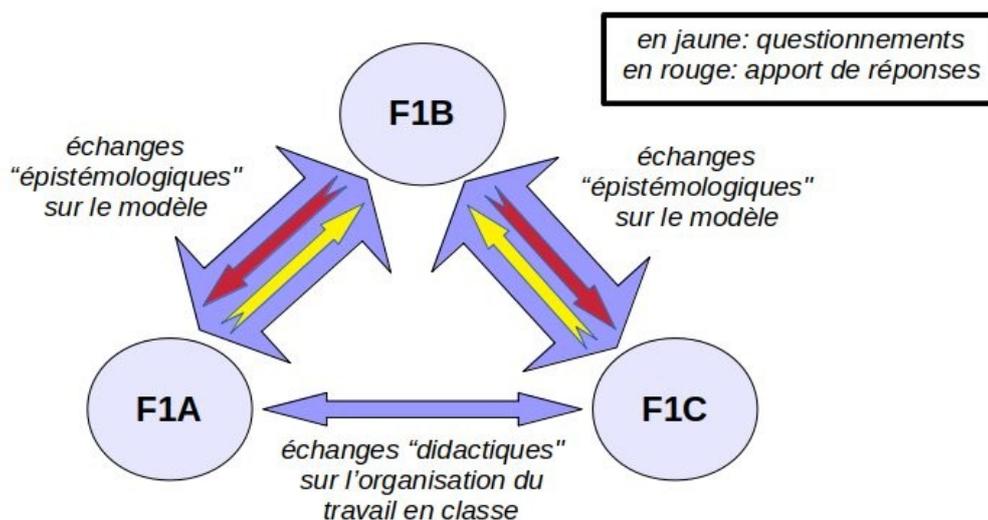


Figure 125: dynamique et nature des échanges entre F1A, F1B et F1C

Structure de la formation

Pendant les entretiens, nous avons demandé aux formateurs de nous décrire brièvement la structure de la journée de formation qu'ils allaient dispenser. Elle comporte quatre parties : la première est introductive, la deuxième est théorique, la troisième concerne les chaînes énergétiques et la quatrième vise à présenter des choix de progression et d'activités¹⁴⁵ à destination d'élèves.

¹⁴⁴ Il ne s'agit pas de sous-entendre qu'il a « inventé » ce modèle, mais de souligner qu'il l'a, en quelque sorte, « enseigné » à F1A et F1C.

¹⁴⁵ Nous utilisons ici le terme « activité » selon le sens qui lui est classiquement donné dans l'enseignement.

F1A et F1B commencent par évoquer une « entrée » dans la formation par les trois propriétés de l'énergie que sont le stockage, le transfert et la conversion ainsi que le principe de conservation de l'énergie, qui sont associés aux verbes « stocker », « transférer », « convertir » et « conserver » (F1C, 387-389 ; F1A, 562-564).

Cette introduction à la formation est animée par F1A, sans raison particulière (F1A, 595-597).

Dans un deuxième temps, ces termes sont « clarifiés » (F1A, 564-565 ; F1B, 592-595), ce qui mène à la description d'un modèle de l'énergie « théorique » (F1A, 564-566 ; F1B, 383-386) et « scientifique » (F1A, 564-566 ; F1B, 390-391), qui s'appuie sur la construction historique et scientifique du concept d'énergie et sur les difficultés des élèves liées à leur expérience de l'énergie dans la vie quotidienne (F1A, 566-573). F1C n'évoque pas explicitement ces moments de la formation ; selon elle, il s'agit de commencer par « montrer aux enseignants quelles sont les difficultés et [comment] les identifier (...), leur expliquer pourquoi il y a des difficultés » (F1C, 228-233). L'animation de cette partie est essentiellement à la charge de F1B, considéré par F1A et F1C comme plus légitime et plus apte à l'animer (F1A, 589-591 ; 598 ; F1C, 243-245).

Vient ensuite la présentation du modèle scientifique scolaire de l'énergie – parmi lequel les chaînes énergétiques – suivie du tracé de chaînes par les enseignants-stagiaires (F1A, 573-581). Les formateurs co-animent cette partie (F1A, 594-595 ; 597-598).

La formation se conclut par la présentation de choix de progression pour l'enseignement de l'énergie (F1A, 582-585 ; F1B, 400 ; F1C, 235-237). Cette partie est animée par F1A et F1C, qui, contrairement à F1B, enseignent en collège. Elles présentent à tour de rôle les activités qu'elles pratiquent le plus (F1A, 591-594 ; F1B, 400-404 ; F1C, 240-243).

16.2.Déterminants potentiels de l'activité des formateurs inférés par analyse des entretiens

Dans cette partie, nous relevons les déterminants susceptibles d'influencer les pratiques des formateurs qui ont été évoqués au cours des entretiens. Nous les catégorisons comme indiqué dans le chapitre 7. Ici, certaines connaissances professionnelles curriculaires sont incluses parmi les déterminants de nature institutionnelle.

Déterminants de nature institutionnelle

Les formateurs évoquent à de nombreuses reprises certaines institutions susceptibles d'orienter leurs pratiques de formation à l'énergie : les programmes scolaires, les manuels scolaires, l'inspection académique, et la communauté de recherche en didactique.

Impact du changement de programme de physique-chimie pour le Cycle 4 (2015)

Le thème de l'énergie était quasiment absent des enseignements de F1A avant la réforme de 2015. À partir de cette date, il est apparu dans les programmes comme thème d'enseignement à part entière, ce qui a obligé F1A à s'en emparer (F1A, 75-76) et à s'intéresser aux chaînes énergétiques, objets qui lui étaient inconnus jusqu'alors (F1A, 82-87 ; 93-94).

Elle souligne également que ces programmes associent de façon privilégiée l'énergie à l'électricité (F1A, 545-546), ce qu'elle prend comme une contrainte forte pour les enseignements, dont elle souhaite se détacher.

Nous remarquons aussi que F1A et F1B jugent la partie du programme de Cycle 4 qui traite de l'énergie trop ambitieuse et trop complexe (F1A, 93-95 ; F1B, 269-278).

Absence de normes institutionnelles pour un modèle scientifique scolaire de l'énergie

Selon F1B, le programme et les manuels scolaires ne fournissent pas de définitions rigoureuses et communes pour les mots et concepts associés à l'énergie (F1B, 274-278).

L'ensemble des formateurs déplore le fait que les chaînes énergétiques ne répondent pas à une norme commune promue de façon institutionnelle, à travers les programmes scolaires et/ou les manuels scolaires (F1A, 95-100 ; F1B, 486-487 ; F1C, 194-196 ; 201-204).

F1B et F1C évoquent aussi le fait que toutes sortes de chaînes énergétiques peuvent et doivent être considérées comme valides lors de la correction de l'épreuve nationale du brevet des collèges, ce qui tend à institutionnaliser l'absence de normes (F1B, 591-606 ; F1C, 202-203).

Prise en compte du regard institutionnel sur le modèle scientifique scolaire proposé

Selon F1B, l'institution ne peut pas promouvoir un modèle de l'énergie pour l'enseignement qui comporte des chaînes énergétiques normées, parce que le formalisme de ces chaînes n'est, selon lui, pas directement identifiable au « savoir savant », c'est-à-dire à la physique telle qu'elle est pratiquée par les physiciens (F1B, 497-499 ; 596-600). D'après F1B, l'institution de l'Éducation Nationale, au travers de l'inspection et des programmes scolaires, refuse de promouvoir des modèles scientifiques *scolaires pour l'enseignement*, arguant que ce ne sont pas des modèles scientifiques « purs » – de physique.

Un modèle scientifique scolaire de l'énergie présenté comme scientifiquement valide

Les formateurs justifient et légitiment l'utilisation du modèle scientifique scolaire qu'ils promeuvent (et, en particulier, les chaînes énergétiques qui lui sont associées) par le fait qu'il ait été élaboré et validé par la recherche en didactique. Citons en particulier F1B :

« je suis arrivé j'ai découvert tout ça en 95 / le labo travaillait beaucoup sur l'énergie / le labo dans lequel j'étais // et moi j'avais un peu travaillé en / en DEA à l'époque sur l'énergie et cætera / et il y avait déjà un modèle de l'énergie en devenir / qui a donné lieu à un ouvrage collectif d'ailleurs qui a été publié par le CRDP (...) on a été à un niveau de perfectionnement de ce modèle extrême // bref / ça fait 25 ans qu'il vit ce modèle / dans des versions différentes // et la dernière chose que je voulais dire c'est que / alors il **il est fonctionnel il est utile je pense qu'il a fait ses preuves et là on a suffisamment de biblio en didactique pour dire qu'il a fait ses preuves et qu'il est pertinent** // il a une spécificité très importante / c'est que / c'est un modèle / purement didactique » (F1B, 475-498)

La communauté de la recherche en didactique est présentée par F1B comme une institution ; par ailleurs, F1A et F1C considèrent que F1B a une légitimité scientifique particulière en regard de son parcours et de ses liens privilégiés avec la recherche en didactique (F1A, 590-591 ; F1C, 243-245).

Regard institutionnel sur la formation disciplinaire selon F1B

Selon F1B (138-141 ; 244-251), il y a une volonté institutionnelle de favoriser les formations transversales au détriment des formations disciplinaires (F1B, 244-251).

Dans la même optique, F1B souligne que le contenu de la formation CAFFA – promue par l’institution – n’est pas disciplinaire, raison pour laquelle il exprime peu d’intérêt à la terminer ; il ne l’avait commencée que pour éviter de perdre la possibilité de dispenser des formations (F1B, 252-256).

Déterminants de nature sociale

Une formation conçue et animée par un collectif

F1A présente cette formation comme collective, conçue et animée à trois :

« là ça va faire la quatrième session / en fait cette formation (...) ce qui s’est passé c’est que F1B F1C et moi sur le niveau collège **on l’a toujours fait ensemble // (...) on a initié ensemble l’idée de la faire au collège / je crois que F1B en faisait une avant niveau lycée / et sur le niveau collège tous les trois on a commencé ensemble / on l’a créée ensemble** » (F1A, 45-47)

F1B décrit plus précisément la nature des échanges qui ont eu lieu entre les formateurs et qui ont abouti à cette formation, en précisant le rôle de chacun avant et pendant la formation :

« et de ce que pouvait dire / identifier comme difficultés F1A // F1A et F1C d’ailleurs / et donc **il y a vraiment un dialogue qui s’est instauré entre nous pendant / pendant quelques années là où on a beaucoup beaucoup travaillé** hein pour faire du / **beaucoup de brainstorming / beaucoup d’allers et retours / sur moi les outils que je pouvais apporter / et la prise en compte des difficultés professionnelles qu’elles pouvaient elles rencontrer avec les élèves / donc on voit bien qu’on a aussi moi je suis arrivé avec énormément de / de matériel / on va dire de réflexions / et ces matériaux ils ont été un peu mis à l’épreuve / c’était génial parce que moi j’ai aussi vu comment F1A qui était qui n’avait pas de formation en didactique / qui débarquait sur ces questions-là / qui était volontaire pour comprendre les choses et qui sentait qu’il y avait un problème // elle elle m’a pas lâché quoi / **elle venait interroger sans arrêt à la fois ce qu’on était capables de proposer / pourquoi on l’avait fait comme ça // et donc ça m’a aussi obligé à moi faire évoluer énormément de choses / dans ce que j’étais capable de proposer / et en fait la façon donc on va se répartir la parole dans la formation bah elle est le résultat de tout ça en fait // et parfois F1A dans la formation dit elle a la parole elle dit ah non **je vais laisser F1B l’expliquer parce que il m’a expliqué il y a quelques années c’est comme ça que j’ai compris** donc je vais lui demander de vous refaire la même chose en gros / voilà / et moi à côté de ça / **des fois / sur certains sujets je dis bah là je ne peux pas me prononcer je vais laisser F1A et F1C vous dire comment ça vit en classe parce que là moi je ne suis pas / je ne suis pas légitime à vous le dire quoi // et c’est très fluide / on se connaît suffisamment // pour que ça ça marche très très bien //** » (F1B, 452-470 ; voir aussi 680-687)****

Ces extraits mettent en évidence une logique et une dynamique similaires à celles décrites dans la répartition de l'animation des différentes parties de la formation : F1B apporte des connaissances scientifiques relatives au concept d'énergie et au modèle scolaire tandis que F1A et F1C nourrissent les échanges par leurs pratiques de classe (Figure 125).

Un besoin de normes partagées par une communauté

F1A évoque la nécessité de l'utilisation d'un formalisme commun pour la représentation des chaînes énergétiques au sein de la communauté des enseignants de physique-chimie, à différentes échelles. Dans un premier temps, elle souligne l'importance de convenir d'une progression et de normes – quelles qu'elles soient – de telle sorte qu'elles puissent être partagées par les enseignants d'un même établissement scolaire (F1A, 79-80 ; 99-100 ; 101-108 ; 120-123 ; 578-579).

Contraintes sociales et évolution des pratiques enseignantes de F1C

Bien qu'ayant envie de faire évoluer ses pratiques concernant l'enseignement de l'énergie au collège, F1C rencontre des difficultés liées à des contraintes sociales. En effet, dans son établissement actuel, les enseignements de collège sont dispensés par huit enseignants de sciences physiques, ce qui implique de suivre une progression commune, rigide et immuable, F1C disant ne pouvoir que difficilement envisager de modifier de son propre chef une activité à destination d'élèves de 5^e (F1C, 276-281). Toutefois, elle dit également ne pas savoir de quelle manière ses collègues enseignent l'énergie en 6^e et en 3^e, ce qui la gêne pour construire ses cours de 5^e (F1C, 169-188).

Rappelons aussi que, lorsqu'elle était à l'étranger, F1C avait rencontré des difficultés pour enseigner l'énergie, en justifiant cela par le fait qu'elle n'avait pas de collègue avec qui construire et discuter de ses cours (F1C, 47-49).

Connaissances professionnelles

Nous n'avons pas repéré de connaissances professionnelles sur l'évaluation, sur les stratégies d'enseignement non disciplinaires ou sur les difficultés des enseignants non disciplinaires. Cela ne signifie pas que ces connaissances n'existent pas, mais elles n'ont été évoquées par aucun formateur dans le contexte de nos entretiens, ce qui nous laisse supposer qu'elles ont peu d'impact sur leurs logiques d'action relatives à la formation et à l'enseignement de l'énergie.

Connaissances sur les stratégies d'enseignement de l'énergie

Les connaissances relatives aux stratégies d'enseignement de l'énergie au collège que nous avons relevées ont été essentiellement évoquées par F1A. Nous supposons que cela s'explique par le fait qu'elle est la seule à enseigner exclusivement au collège, et qu'elle a conçu la plupart des activités dont il sera question pendant la formation.

L'importance de l'utilisation de normes claires

Enseigner l'énergie au collège implique l'utilisation et la formalisation de normes, à l'échelle de la classe, des enseignants de physique d'un même établissement, pendant l'ensemble des années de collège (F1B, 588-590 ; F1A, 95-100). Selon F1A, ces normes ne doivent pas être issues de manuels scolaires, en particulier pour l'élaboration de chaînes énergétiques (F1A, 576-577) – tous

les formateurs ayant fait le constat de l'absence d'un consensus rigoureux et clair (voir section précédente).

Prise en compte de la polysémie du terme « énergie »

F1A souligne que le concept d'énergie ne prend pas le même sens en physique-chimie et dans les autres disciplines scolaires, en particulier en SVT et en technologie. Elle propose de débattre de l'énergie avec les élèves en prenant appui sur ces différentes approches, qu'elle envisage comme un levier et non comme un frein pour les apprentissages (F1A, 215-223 ; 165-171). F1A propose d'utiliser le concept d'énergie tel qu'il est évoqué dans la vie quotidienne et dans la société selon la même logique (F1A, 235-240).

D'une façon plus générale, F1A souligne la nécessité de clarifier le vocabulaire relatif à l'énergie, notamment en lien avec la vie quotidienne, puis de s'appuyer sur ce vocabulaire pour enseigner l'énergie en physique (F1A, 531-538 ; 270-273).

Progressivité des enseignements

F1A propose un enseignement progressif de l'énergie tout au long du collège, en commençant par une approche qui ne prend pas en considération les appareils électriques et les transferts électriques (F1A, 416-418 ; 545-546). F1B évoque également cette stratégie pour l'enseignement de l'énergie (F1B, 668-675). Nous y reviendrons plus en détail par la suite (§16.4).

Le germe de modèle proposé pour les élèves de début de collège ne comporte pas de convertisseurs et ne décrit que des situations dans lesquelles il n'y a pas de « pertes » d'énergie (F1A, 419 ; 471-477).

Enfin, F1A suggère de ne parler de puissance qu'en fin de Cycle, ce concept nécessitant une certaine maîtrise du modèle de l'énergie (en particulier, une bonne connaissance de tous les transferts et de la plupart des formes d'énergie, ainsi que la compréhension de chaînes énergétiques complexes) (F1A, 453-457).

Propriétés et définitions de l'énergie

Pour F1A, la découverte de la conservation de l'énergie se fait par l'étude de situations dans lesquelles il n'y a pas de « pertes » d'énergie (F1A, 480-482). En dehors de cela, nous n'avons pas relevé de stratégies d'enseignement concernant les différentes propriétés de l'énergie.

F1A et F1C recommandent de ne pas définir l'énergie au collège. Cependant, F1C peut proposer une définition pour le collège :

« en collège je vais dire quelque chose qui ressemble plus à la définition de Rankine / que c'est la capacité d'un corps à // à se transformer à subir des transformations à transformer son extérieur / influencer l'extérieur » (F1C, 301-303)

Cette définition n'est toutefois pas jugée nécessaire et F1C considère qu'elle peut engendrer des difficultés, comme la confusion entre énergie, intensité et force, ou la croyance que l'énergie est une entité matérielle (F1C, 310-326).

F1A propose d'attribuer à l'énergie des caractéristiques, vues et présentées comme des « règles du jeu » à appliquer et qui permettent d'utiliser le concept d'énergie même sans le comprendre (F1A, 288-291).

Connaissances sur les stratégies de formation non disciplinaires

Des formations par la « recherche-action »

F1B (58-64 ; 73-76) promeut les formations qui s'appuient sur des « recherches-action », pendant lesquelles sont évoqués et diffusés des documents issus d'une collaboration entre enseignants et chercheurs en didactique (F1B, 73-76).

Selon lui, les activités à destination d'élèves proposées pendant la formation ont été auparavant expérimentées en classe par F1A et/ou F1C, afin d'enrichir la formation via le groupe de recherche collaborative. Ces expérimentations ne sont pas à proprement parler des travaux de recherche, mais sont évaluées selon le ressenti des enseignants qui les ont menées (F1B, 88-101).

Des formations qui permettent aux stagiaires d'obtenir des ressources

Il est nécessaire que les stages de formation que propose F1B mettent des ressources directement utilisables à disposition des enseignants (F1B, 150-151 ; 196-199). F1C souligne également l'importance de la mise à disposition de ressources pour les enseignants (F1C, 209-213).

De la même manière, F1B n'apprécie pas les formations dans lesquelles les enseignants-stagiaires sont invités à concevoir des ressources par eux-mêmes (F1B, 185-193).

Des formations qui permettent une remise à niveau scientifique des enseignants

Selon F1B, les enseignants qui s'inscrivent à une formation disciplinaire ont souvent besoin d'une remise à niveau sur le contenu scientifique à enseigner (F1B, 217-222). De ce fait, il propose des stages de formation qui comportent systématiquement un contenu scientifique théorique (F1B, 155-159).

Des formations qui s'inscrivent dans une progressivité des enseignements

F1B souligne l'importance de connecter, pendant la formation, le contenu des enseignements selon les niveaux scolaires, en particulier entre le collège et le lycée (F1B, 164-168).

Cette stratégie de formation a été évoquée uniquement dans le cadre de la formation à l'énergie pour le collège, mais on peut supposer qu'il s'agit d'une stratégie de formation à une échelle plus large, rien n'indiquant qu'elle soit spécifique au thème de l'énergie.

Des formations où le formateur est expert de ce à quoi il forme

Les trois formateurs soulignent la légitimité particulière de F1B à animer la partie de la formation relative au concept scientifique d'énergie, présenté sous un angle théorique. Cette légitimité est due au parcours de F1B, considéré comme expert de l'enseignement de l'énergie, notamment parce qu'il a « fait des publications » à ce sujet (F1B, 433-434 ; 589-591 ; F1A, 589-591 ; F1C, 243-250).

À l'inverse, F1B n'envisage pas de présenter les choix de progression et les activités proposées pour les classes de collège, qu'F1A et F1C animent parce qu'elles les mettent en œuvre dans leurs classes (F1B, 438-439).

F1A précise que les activités conçues par un formateur sont présentées par ce formateur (F1A, 591-593).

Ceci nous conduit à considérer que, pour F1A, F1B et F1C, il est appréciable – voire nécessaire – qu'un formateur soit expert ou expert d'usage de ce à quoi il forme.

S'appuyer sur ses propres erreurs

Pendant les formations, F1A explique souvent aux enseignants-stagiaires les erreurs qu'elle faisait (en tant qu'enseignante), pour les mettre en garde et leur éviter de faire ces mêmes erreurs (F1A, 598-607).

Connaissances sur les stratégies de formation à l'énergie

Les seules connaissances relatives à des stratégies de formation spécifiques à l'énergie que nous avons relevées sont les aspects scientifiques que F1B juge nécessaires à aborder pendant la formation – le premier principe de la thermodynamique, l'énergie interne, l'énergie cinétique et l'énergie potentielle :

« c'est une formation qui vient /qui a été déclinée de la / d'une formation qu'on a fait beaucoup plus souvent au lycée / enseigner l'énergie au lycée / et franchement dans cette formation enseigner l'énergie au lycée c'est pareil on passe une heure ou deux à faire de la physique / vraiment // à rappeler / à faire le lien avec le premier principe ce que c'est que l'énergie interne d'où vient l'énergie cinétique comment on construit l'énergie potentielle enfin on fait de la physique / voilà / vraiment // et ça je l'assume complètement » (F1B, 205-211)

Connaissances sur les difficultés des élèves

Pendant notre entretien, F1B n'a pas distingué les difficultés des élèves de celles des enseignants¹⁴⁶. Cependant, nous constatons que son discours ne porte jamais spécifiquement sur les élèves, mais plutôt sur les enseignants, c'est pourquoi nous choisissons de considérer les difficultés qu'il évoque comme des difficultés enseignantes ; nous en reparlerons donc à la section suivante.

Un concept polysémique

F1A et F1C évoquent la polysémie du mot énergie et notamment les différences de sens qu'il prend dans la vie quotidienne et en sciences physiques (F1A, 272-273 ; F1C, 261-267).

Selon F1A, le fait que le concept d'énergie soit vu différemment selon les disciplines scientifiques au collège est une difficulté pour les élèves, mais elle est due à la manière dont le concept est enseigné et n'est pas une difficulté en soi (F1A, 170-174).

146 En dehors du moment où nous lui avons demandé quelle était la principale difficulté à laquelle les élèves de collège étaient confrontés lorsqu'on leur enseigne l'énergie en collège.

Un concept abstrait

De la même manière, pour F1A, le fait que l'énergie soit un concept abstrait est souvent vu comme une difficulté pour les élèves à cause de la manière dont elle est enseignée, mais ce n'est pas une difficulté en tant que telle (F1A, 169-157).

F1C définit l'énergie de façon abstraite, et cette définition la satisfait ; cependant elle ne peut pas la donner à des élèves de collège, qui, selon elle, se retrouveraient alors en difficulté (F1C, 307-309).

Pour F1B, le caractère abstrait de l'énergie est la difficulté majeure à laquelle les élèves de collège sont confrontés lorsqu'on leur enseigne le concept d'énergie. Il considère l'énergie comme un concept plus abstrait que celui de masse ou de vitesse (F1B, 615-627).

Un concept associé à l'électricité

Selon F1A, les élèves de 6^e associent exclusivement l'énergie à l'électricité et aux appareils électriques, voire au Soleil (427-431, 551). Elle considère cela comme un obstacle majeur à l'apprentissage de l'énergie en sciences physiques (c'est pourquoi elle propose un enseignement de l'énergie déconnecté de l'électricité en début de collège, voire ci-avant).

Des difficultés mathématiques

Pour F1A, la seule difficulté réelle à laquelle sont confrontés les élèves auxquels elle enseigne l'énergie est liée à l'introduction de la puissance, notion qui leur demande d'effectuer des calculs (F1A, 452-453 ; 504-508).

Dégradation et « pertes » d'énergie

F1A n'évoque pas le concept de dégradation (ni celui d'entropie ou le second principe de la thermodynamique), mais parle des « pertes » d'énergie, qu'elle juge difficiles – sans préciser si elles sont difficiles à comprendre, à interpréter ou à représenter (F1A, 471-483).

Connaissances sur les difficultés des enseignants

F1A, F1B et F1C affirment que les enseignants ont des difficultés à enseigner l'énergie (ce pourquoi ils s'inscrivent en formation), mais qu'ils ne sont pas conscients des raisons pour lesquelles ce sujet leur semble particulièrement délicat à enseigner (F1A, 147 ; F1B, 162-163 ; F1C 221-222 ; 230-231).

Si une partie des difficultés rencontrées par les enseignants sont similaires à celles de leurs élèves, elles ont également une composante institutionnelle forte, en relation avec l'absence de consensus concernant les règles, normes et définitions de termes et concepts liés à l'énergie.

Un concept polysémique et abstrait

Selon les formateurs, les enseignants considèrent que les différences d'approche de l'énergie entre disciplines scientifiques au collège sont un obstacle pour l'enseignement (F1A, 161-162 ; 224-228 ; F1B, 145-147 ; 263-269 : « ils voient bien que ça frotte beaucoup avec leurs collègues des autres disciplines »).

Le sens donné au mot « énergie » dans la vie quotidienne est différent de celui qu'il revêt en physique, ce qui pose aussi problème aux enseignants (F1B, 351-354 ; F1A, 272-273).

Selon F1A, le fait que l'énergie soit un concept « abstrait » empêche les enseignants de trouver des « expériences à faire en classe », ce qui constitue pour eux une difficulté majeure pour enseigner l'énergie (F1A, 154-155 ; 160-161).

Des programmes confus et complexes

F1C considère que « les programmes (...) véhiculent des confusions » (F1C, 195-196), tandis que F1B souligne qu'« ils ont été retouchés ça va plutôt mieux mais la première version des programmes de collège était quand même / compliquée à comprendre et je pense qu'on a laissé / on a laissé les collègues vraiment dans l'embarras » (F1B, 269-272). Les programmes sont vus comme à la fois contraignants et peu clairs, à l'origine de difficultés spécifiques pour les enseignants.

Des chaînes énergétiques qui ne répondent à aucune norme claire

L'ensemble des formateurs évoquent l'absence de règles communes pour les représentations des chaînes énergétiques (en particulier dans les manuels scolaires) comme une difficulté majeure à laquelle sont confrontés les enseignants (F1B, 588-594 ; 602-610 ; F1C, 193-204 ; F1A, 101-108 ; 577-578).

Difficultés liées à l'appropriation du modèle proposé

F1A souligne qu'elle a eu elle-même des difficultés à s'approprier le modèle promu pendant ce stage de formation et suppose que les enseignants-stagiaires vont être confrontés à ces mêmes difficultés (F1A, 598-607).

Un manque de connaissances scientifiques chez les enseignants

Selon F1A, les difficultés des enseignants relatives à l'enseignement de l'énergie sont essentiellement dues à un manque de connaissances scientifiques de leur part (F1A, 147-149). Elle considère que pour enseigner l'énergie, il faut maîtriser le concept scientifique d'énergie (F1A, 134-144 ; 156-157 ; 181).

De la même manière, F1B explique qu'« **il y a des collègues de collège pour lesquels l'énergie est un ovni** et donc / faire une heure de physique avec eux ça peut être bénéfique » (F1B, 203-205). Selon lui, maîtriser le concept scientifique d'énergie est nécessaire pour comprendre les enjeux liés au concept sociétal d'énergie, or les connaissances scientifiques qui le sous-tendent ne sont pas sues de tous les enseignants (F1B, 363-378).

Buts et valeurs de l'éducation et de la formation

Nous n'avons relevé que très peu de traces des buts et des valeurs de l'éducation et/ou de la formation dans le discours des formateurs.

Nous soulignons que pour F1B, la formation continue pour les enseignants de physique-chimie doit être avant tout une formation disciplinaire (F1B, 252-256).

Nous remarquons également que, pour F1C, la formation continue a pour objectif principal de rassurer les enseignants :

« je pense [que l'objectif principal de la formation, c'est] de donner / de **rassurer les enseignants** en fait parce que je pense que l'énergie est un de ces thèmes qui / produit une grande confusion / parce que ce n'est pas facile / et parce que l'institution et les manuels ne // m'aident pas par rapport à ça / les programmes pour moi véhiculent des confusions / et les manuels aussi // et / je // **j'ai été dans cette espèce de désarroi et en fait je me suis rendue compte / enfin voilà j'ai été rassurée le jour où j'ai compris que je n'étais pas la seule** et que ce n'était pas si simple » (F1C, 193-198)

Orientation pour l'enseignement des sciences

F1B déclare que l'enseignement des sciences et, plus particulièrement, de la physique, est indissociable de l'activité de modélisation (F1B, 480-482).

Il évoque également un enseignement des sciences avec un objectif de « formation du citoyen » au « défi énergétique » (F1B, 364-378).

Cette problématique est évoquée par F1A lorsqu'elle présente une activité à destination d'élèves de troisième, sans la présenter pour autant comme devant orienter l'enseignement des sciences (F1A, 484-497). Elle n'est pas mentionnée par F1C.

16.3. Modèle scientifique scolaire de l'énergie

Comme nous l'avons montré dans la première section de ce chapitre, F1A et F1C ont « appris » le modèle scientifique scolaire de l'énergie proposé par F1B. Nous considérons donc comme probable que les trois formateurs évoquent un même modèle – ou, *a minima*, qu'il y ait une large cohérence entre les modèles qu'ils utilisent.

Dans cette section, nous mettons en évidence le modèle scientifique scolaire qu'ils promeuvent : nous commençons par décrire les éléments spécifiques qui le composent, auxquels les formateurs font souvent référence (convertisseurs et réservoirs d'énergie), ainsi que la manière dont les différentes caractéristiques habituellement attribuées à l'énergie dans le secondaire (voir §3.1, Tableau 1) ont été abordées par les formateurs. Nous rapportons ensuite quelques limites de ce modèle.

Le modèle : éléments spécifiques et caractéristiques de l'énergie

Convertisseurs et réservoirs d'énergie

Les formateurs identifient les objets – au sens large – à deux sortes de systèmes, selon leur « fonction énergétique » : les *réservoirs* et les *convertisseurs* d'énergie.

Pour F1C, un réservoir est « un système qui peut stocker de l'énergie, et recevoir ou émettre des transferts d'énergie si le réservoir est en interaction avec d'autres systèmes » (F1C, correspondance par courriel). F1B identifie les réservoirs à la « fonction stockage », par opposition aux flux d'énergie, aux transferts d'énergie et à leurs changements de mode par des convertisseurs, systèmes qu'il définit, à l'instar de F1C, comme faisant « changer de mode de transfert » (F1B, 481-491 ; F1C, 70-86). F1C complète cette définition en précisant qu'un convertisseur est « un système qui, d'un point de vue énergétique, ne stocke pas mais convertit un mode de transfert en un autre » (F1C, correspondance par courriel).

Pour F1A, un réservoir « stocke » l'énergie (F1A, 354-355 : « un système qui stocke de l'énergie / point / qui stocke de l'énergie on s'arrête là ») tandis qu'un convertisseur la « convertit » (F1A, 272) et « ne stocke rien » (F1A, 306-307). Elle présente cette définition du convertisseur comme plus précise et plus rigoureuse que de considérer qu'il « change / ce qui est entrant et sortant ce n'est pas les mêmes transferts » (F1A, 357).

F1B précise que certains objets – à l'instar de la pile – cumulent les fonctions de stockage et de conversion d'énergie (F1B, 566-572). Cependant, F1A et F1C opposent clairement *réservoir* et *convertisseur* : puisque le réservoir « stocke » de l'énergie tandis que le convertisseur « ne stocke rien », un même objet ne peut *a priori* pas cumuler les deux fonctions.

Dans ce modèle, un réservoir est un système qui « stocke » de l'énergie sans changer de mode de transfert, et un convertisseur est un système qui change un mode de transfert sans « stocker » d'énergie. La question du sens donné au verbe « stocker » se pose, mais elle n'a jamais été abordée pendant nos entretiens. Nous supposons qu'un système qui « stocke » de l'énergie est un système dont la quantité d'énergie est susceptible de varier, tandis que la quantité d'énergie attribuée à un système qui ne « stocke » pas d'énergie est fixe. Cependant, nous soulignons que l'utilisation du verbe *stocker* en opposition au verbe *convertir* traduit l'idée d'une absence totale d'énergie associée aux systèmes de type *convertisseur*.

L'énergie : une grandeur physique

Au cours de nos entretiens, les formateurs n'ont globalement pas présenté l'énergie comme une grandeur physique, bien que F1B finisse par la définir comme « une grandeur physique // qui // a pour propriété première de se conserver » (F1B, 656-657). On peut aussi considérer que F1C présente l'énergie comme une grandeur dans la définition qu'elle lui donne, mais qu'elle réserve aux élèves de lycée (« pour mes niveaux de lycée je vais dire que c'est une construction mathématique / que c'est un concept très / très mathématique / qui / qui prend plusieurs formes et pour / chaque forme a une formule différente / mais qui est toujours homogène » F1C, 297-299).

L'énergie : une abstraction mathématique et physique

Le modèle scientifique scolaire présenté par les formateurs repose sur la distinction entre réservoirs et convertisseurs d'énergie, systèmes susceptibles de « stocker » ou non de l'énergie, qui n'est donc pas présentée comme une abstraction.

Parmi les trois formateurs, seule F1C évoque clairement le fait que l'énergie soit une grandeur abstraite (F1C, 282-285), mais elle préfère ne pas mentionner cette caractéristique à un niveau collège (F1C, 307-309).

Au cours de notre entretien, F1B ne mentionne pas explicitement le caractère abstrait de l'énergie, mais il l'évoque lorsqu'il discute de la principale difficulté à laquelle les élèves sont confrontés lorsqu'on leur enseigne l'énergie au collège (F1B, 615-622).

Pour F1A, les enseignants évoquent le caractère abstrait de l'énergie comme une difficulté majeure, c'est pourquoi elle propose un enseignement de l'énergie qui a pour but de rendre ce concept moins abstrait, notamment par le biais d'expériences. F1A considère l'énergie comme

abstraite lorsqu'elle est mal comprise par l'enseignant, et devenant de moins en moins abstraite au fur et à mesure que ce dernier se réapproprie le concept scientifique d'énergie (F1A, 153-157).

La puissance : un débit d'énergie

Au cours de l'entretien, F1A évoque la puissance lorsqu'elle décrit la progression de ses enseignements sur l'énergie au collège, en la définissant comme un « débit » d'énergie dont elle propose une représentation par des flèches épaisses figurant sur des chaînes énergétiques (F1A, 452-470). Elle reviendra sur la notion de puissance pour souligner les difficultés engendrées par les calculs mathématiques qui lui sont liés (F1A, 504-507).

F1B n'évoque pas le mot « puissance » de tout l'entretien, et F1C ne le mentionne que pour signaler que, selon elle, la puissance ne peut pas être représentée sur les chaînes énergétiques (F1C, 124-133).

L'énergie : une grandeur qui se conserve

F1A parle à plusieurs reprises de la conservation de l'énergie, dans un sens qui apparaît, dans un premier temps, conforme à celui qu'il prend en physique. Elle la présente comme un « principe fondamental » associé à l'énergie (F1A, 284 ; 295-296), et ajoute :

« le principe de conservation il a été saupoudré partout globalement vu qu'on n'avait pas de pertes / **ce qui rentrait sortait** / donc ils savent que voilà / donc on introduit la réalité du fonctionnement de la lampe qui n'est pas idéale et que malheureusement il y a des pertes » (F1A, 480-483)

Ici, elle associe le principe de conservation de l'énergie au fait que *tout ce qui rentre sort*, c'est-à-dire que toute l'énergie qui entre *dans un convertisseur sort de ce convertisseur*. Or, c'est ainsi qu'elle définit le convertisseur. Selon nous, la définition qu'elle donne à un convertisseur n'est pas identifiable à la propriété de conservation de l'énergie. De plus, elle oppose la conservation de l'énergie au fonctionnement réel d'une lampe, dans laquelle il y a des « pertes ». Ces citations, qui peuvent être vues comme contradictoires, ne nous permettent pas d'affirmer quel sens F1A donne au principe de conservation de l'énergie.

Pendant l'entretien, F1B n'évoque pas la conservation de l'énergie lorsqu'il parle du modèle scientifique scolaire de l'énergie au collège. Il mentionne la conservation de l'énergie mécanique, sans lien avec l'enseignement de l'énergie au collège (F1B, 532-534), et la conservation de l'énergie, en toute fin d'entretien, lorsqu'il lui est demandé de définir l'énergie :

« alors globalement je dirais [l'énergie] c'est une grandeur physique // **qui // a pour propriété première de se conserver / pour un système qui n'échange rien avec un autre système** (silence 6 secondes) voilà / si j'ai droit à plus de mots bah faut regarder le modèle de l'énergie en gros il dit que c'est quelque chose qui se conserve / quelque chose qui peut changer de forme / et qui peut être transféré // voilà / qui peut être donné à d'autres systèmes / ou reçu d'autres systèmes // voilà donc ça c'est la définition la plus large que je pourrais donner » (F1B, 656-661)

Ici, F1B décrit la conservation de l'énergie comme un principe valable *pour un système isolé*, et non comme une propriété fondamentale de l'énergie (notre mise en gras).

F1C évoque également la conservation de l'énergie à une reprise, sans l'expliciter ; selon elle, la conservation de l'énergie est la chose la plus importante à retenir des enseignements relatifs à l'énergie au collège (F1C, 268-271).

Nous en déduisons que, dans ce modèle scientifique scolaire, la conservation de l'énergie n'apparaît pas comme une caractéristique principale de l'énergie au collège.

Conversions et transformations d'énergie

Les conversions d'énergie n'ont presque pas été évoquées en tant que telles par les formateurs, qui parlent cependant à de nombreuses reprises de « convertisseurs », dont F1B et F1C disent qu'ils changent le mode de transfert de l'énergie – ce qui correspond bien au sens que nous donnons aux conversions d'énergie.

Seule F1A utilise le mot conversion, pour mettre en évidence la confusion possible entre « conversion » et « transformation » d'énergie, qu'elle définit comme un changement de forme « interne au système » (F1A, 320-325).

F1C mentionne également les transformations d'énergie, en les définissant comme des changements de forme d'énergie au sein d'un système et en précisant qu'elles ne peuvent pas être représentées sur les chaînes énergétiques (F1C, 141-145) ; elle les évoque dans ses classes de lycée. F1B n'a pas parlé de transformations d'énergie au cours de notre entretien.

Nous en déduisons que les transformations d'énergie ne font pas partie du modèle scientifique scolaire de l'énergie proposé par ces formateurs au collège, tandis que les conversions d'énergie sont au cœur de ce modèle.

L'énergie : une grandeur exclusivement « stockée » sous différentes formes

Différentes formes d'énergie ont été mentionnées par les formateurs pendant les entretiens. Nous ne leur avons pas demandé de préciser quelles étaient ces formes et aucun d'entre eux ne les a listées. Les formes d'énergie ont été évoquées par les formateurs dans un sens compatible avec celui qu'elles prennent en sciences (§2.3). Il s'agit des énergies potentielle (nombreuses occurrences dans tous les entretiens), cinétique (idem), thermique (évoquée à plusieurs reprises par F1A), chimique (évoquée à plusieurs reprises par F1A et une fois par F1C, 167). F1C ajoute que la distinction entre les différentes formes d'énergie se fait aussi en leur associant des formules, mais uniquement au lycée (F1C, 298-299).

F1A et F1C opposent les *formes* d'énergie aux *transferts* d'énergie¹⁴⁷ (F1A, 424 ; 455-456 ; F1C, 74-76).

L'énergie est présentée comme « stockable » et « stockée » par F1A et F1B (F1A, 284-285 ; 338 ; 424 ; F1B, 492-493 ; 627-630).

147 Dans son discours, F1B oppose « réservoirs » et « transferts », comme nous l'avons vu précédemment.

Transferts d'énergie

Dans le modèle choisi, les transferts d'énergie ne sont pas considérés comme *de l'énergie*, puisqu'ils ont lieu *entre* des systèmes ; or, l'énergie ne peut qu'être *stockée*, c'est-à-dire contenue dans des systèmes.

Au cours des entretiens, différents modes de transferts ont été évoqués spontanément par les formateurs. Bien que nous ne leur ayons pas posé de questions relatives aux transferts d'énergie, F1A nous en a donné une liste : il s'agit des transferts électrique, mécanique, thermique et par rayonnement (F1A, 424-246)¹⁴⁸.

Les trois formateurs ont souligné que les transferts d'énergie et les formes d'énergie (voire l'énergie, pour F1B) se distinguent d'une part parce que l'énergie se stocke, contrairement aux transferts, et d'autre part parce que les effets des transferts sont « observables », à l'inverse de l'énergie, qui est invisible.

F1A explique que la distinction entre l'énergie (invisible) et les effets des transferts (visibles) lui a été difficile à assimiler et est au cœur du modèle proposé (F1A, 178-180). Elle a ensuite précisé son propos :

« par exemple / ce que je vais voir c'est une élévation de la température / si je mesure la température dans un récipient // mais en même temps c'est les effets d'un transfert thermique // je je je ne vois pas l'énergie je ne vois pas l'énergie thermique je dis aux élèves je ne vois pas le transfert thermique / mais je vois ce qu'il provoque / et si il se passe un phénomène je leur dis comme nous on n'est pas profs de magie / on va essayer de modéliser d'en trouver des explications / et on voit que dans beaucoup d'expériences **si on applique ce modèle / du transfert thermique ou d'autres transferts eh bien on arrive à justifier des observables** / mais je rappelle constamment aux élèves que **ce qu'on observe ce n'est pas de l'énergie thermique** comme je peux dire j'observe du sel / j'observe de l'eau / ça je peux le dire mais je ne peux pas dire j'observe de l'énergie thermique // **j'observe l'effet de l'augmentation par exemple du stock d'énergie thermique dans mon / dans ma tasse** » (F1A, 183-193)

De la même manière, F1B et F1C présentent l'énergie comme invisible, immatérielle, à l'inverse des transferts, considérés comme observables, en utilisant des expressions similaires, mises en relief dans les citations suivantes :

« on leur demande de travailler sur quelque chose qui n'a aucune matérialité quoi / avec / en plus cette difficulté que l'énergie on leur dit que ça se stocke / mais on ne la verra jamais // et pire // on ne verra jamais l'énergie quand elle est stockée // on verra / on ne peut pas voir qu'il y a de l'énergie stockée lorsqu'elle est stockée / ça va plus loin hein // je ne peux pas savoir dans un objet donné s'il y a de l'énergie stockée // par contre / pour savoir s'il y avait de l'énergie stockée / il faut que je fasse un transfert // c'est-à-dire que **la seule manifestation observable / d'un stockage de l'énergie // c'est de la déstocker et de la transférer // faut que ça brûle / il faut que ça brille / il faut qu'il y ait de l'électricité faut que ça bouge** / voilà // et à partir de là je pourrai dire ah mais il y avait de l'énergie stockée dans le bidule // c'est-à-dire que / c'est aussi quelque chose qu'on porte très fort dans la formation c'est que / **ce qui est observable / au sujet de l'énergie ce sont les transferts // et pas les réservoirs** » (F1B, 626-645)

148 F1A ne définit pas ces transferts mais précise que « rayonnement » est un terme plus large que celui de lumière, qui ne concerne que le visible (F1A, 275-279).

« [l'énergie c'est] quelque chose qui se conserve / et que **c'est / les transferts qu'on visualise en fait enfin qu'on visualise non qu'on perçoit** / la lumière l'électricité / que **c'est ces manifestations-là qu'on voit / mais que l'énergie en elle-même elle n'est pas visible** (..) le mot perçoit n'est pas adapté c'est vrai / je je leur dis que c'est les manifestations qui sont euh // si je dois leur dire visibles // qui sont euh expérimentales il faudrait que je dise peut-être / mais qu'**en tout cas c'est / est-ce que ça chauffe est-ce que ça / est-ce que ça bouge / est-ce que ça fait de la lumière ou est-ce que ça fait de l'électricité** // » (F1C, 329-337)

Dans le cadre de la modélisation (Figure 32), nous identifions que l'ensemble des formateurs situent l'énergie dans le monde théorique. Cependant, les formateurs inscrivent les transferts à la fois dans le monde empirique (« transferts observables ») et dans le monde théorique, où ils sont associés à des événements bien particuliers, listés par F1B et F1C (ça bouge, ça brille, ça chauffe, il y a de l'électricité).

Nous avons posé la question de l'observabilité de l'électricité à F1B et F1C, qui considèrent ce mode de transfert comme particulier et justifient son caractère observable par l'utilisation d'appareils de mesure (F1B, 638-645 ; F1C, 337-343).

De notre point de vue, assimiler les événements « ça chauffe », « ça brille », « ça bouge » à des transferts d'énergie est également problématique. Si « ça chauffe » fait référence à un objet dont la température augmente, alors cet événement est associé à une augmentation de l'énergie interne d'un système, et non à un transfert thermique. Associer l'événement « ça brille » au rayonnement le limite à la lumière visible (pas de prise en compte de l'UV / IR) ; par ailleurs, dans le langage courant, l'expression « ça brille » fait référence à un objet qui brille et non à la lumière qu'il émet. Le fait d'associer un objet en mouvement (« ça bouge ») à un travail mécanique est également problématique : en particulier, un objet ayant un mouvement rectiligne uniforme peut difficilement être associé à une variation d'énergie et à un travail mécanique.

Dégradation de l'énergie

Pendant nos entretiens, ni l'entropie, ni le second principe de la thermodynamique, ni le concept de dégradation n'ont été mentionnés par les formateurs. Seule F1A a évoqué des « pertes » d'énergie, mais sans les définir ni les présenter sous un angle scientifique. Elle précise que ces « pertes » sont intégrées au modèle en classe de troisième et elle les présente en opposition à la conservation de l'énergie :

« le principe de conservation il a été saupoudré partout globalement vu qu'on n'avait pas de pertes / ce qui rentrait sortait / donc ils savent que voilà / donc on introduit la réalité du fonctionnement de la lampe qui n'est pas idéale et que malheureusement il y a des pertes » (F1A, 480-483)

La dégradation n'apparaît pas comme un élément fondamental du modèle scientifique scolaire de l'énergie que nous avons mis en évidence. Cependant, c'est une propriété fondamentale de l'énergie, nécessaire pour une bonne compréhension des enjeux sociétaux liés à l'énergie (§3.1, *Dégradation de l'énergie*). D'après les formateurs, ces enjeux doivent pouvoir être discutés à la lumière du concept scientifique scolaire d'énergie, comme l'explique F1B :

« cette problématique sociale ou sociétale autour de l'énergie impose de faire comprendre aux élèves que **si on a problème d'énergie si on a / si l'énergie est un problème aujourd'hui** / si on en parle autant / c'est que **c'est un problème de stocks et de flux** / voilà (...) et je pense que / cette conclusion-là elle n'est pas évidente pour tous les collègues qui enseignent ça au collège / voilà / donc c'est pour ça que **j'en fais un objectif aussi de la formation** // c'est à la fois **un objectif d'apprentissage majeur** / et c'est aussi une idée forte à porter dans la formation » (F1B, 363-378)

Selon F1B, ce n'est pas le caractère *dégradable* de l'énergie qui explique le mieux ce qu'il appelle le « défi énergétique », mais le fait que l'énergie ne se stocke pas : elle « quitte » les réservoirs associés aux ressources énergétiques naturelles. Cette vision de l'énergie, sans mention de dégradation, apparaît consumériste, contradictoire avec le principe de conservation de l'énergie.

Les chaînes énergétiques

Les formateurs proposent une représentation des phénomènes énergétiques par des chaînes énergétiques (F1B, 602-604 ; F1C, 74-82), qui sont au cœur du modèle scientifique scolaire qu'ils promeuvent. Les normes qu'ils utilisent impliquent de représenter les convertisseurs d'énergie par des cercles, les réservoirs d'énergie par des rectangles, et les transferts par des flèches (RP-F1 ; les normes de représentation n'ont pas fait l'objet de questions spécifiques lors des entretiens).

Au cours de l'entretien, F1C a évoqué un symbolisme qui permet de représenter les transformations internes au système (F1C, 141-145), semblable à celui d'une chaîne *avant-après*, qu'elle ne considère pas comme une chaîne énergétique et qu'elle juge inutile au collège (F1C, correspondance par courriel).

Utilisation des chaînes énergétiques

Représentation instantanée de phénomènes simultanés

Pour F1A, l'utilisation des chaînes énergétiques permet de visualiser des phénomènes qui ont lieu de façon simultanée, qui paraîtraient successifs s'ils étaient décrits par des phrases (F1A, 384-388). F1B partage ce point de vue mais le modère en soulignant que les chaînes énergétiques tendent à renforcer le raisonnement linéaire causal, c'est-à-dire l'idée que les phénomènes représentés sont successifs plutôt que simultanés (F1B, 572-576).

Mise en évidence du stockage et de la conservation de l'énergie

L'ensemble des formateurs ont évoqué la visée descriptive et représentative des chaînes énergétiques qu'ils promeuvent. F1C souligne que la chaîne énergétique permet de visualiser le fait que l'énergie se stocke et se conserve (F1C, 70-86 ; communication par courriel). F1A évoque également une représentation de la conservation de l'énergie sur les chaînes énergétiques (F1A, 423).

Bien que F1A et F1C considèrent que ces chaînes sont une illustration de la conservation de l'énergie, selon nous, elles ne peuvent pas représenter le fait que la quantité totale d'énergie ne varie pas entre deux instants, puisqu'elles représentent un instantané (voir paragraphe précédent). Cependant, elles représentent le déplacement de l'énergie d'un endroit à un autre.

Mise en évidence de la distinction entre convertisseurs et réservoirs

F1A propose un grand nombre d'expériences afin d'illustrer les éléments du modèle, et en particulier le concept de convertisseur et celui de réservoir. Elle propose la construction d'une pile aluminium-air, qui débite dans une DEL (F1A, 434-441). À ce stade, ses élèves utilisent un modèle de l'énergie qui prend uniquement en compte les réservoirs d'énergie. Les élèves font débiter leur pile dans une DEL, et doivent représenter cette situation sous forme de chaîne énergétique. La schématisation habituelle des systèmes par des rectangles qui représentent des objets dont la fonction est de stocker l'énergie n'est plus satisfaisante, ce qui fait émerger l'idée du convertisseur. Il s'agit d'une utilisation heuristique du germe de chaîne utilisé (F1A, 441-447).

F1B parle de la modélisation du fonctionnement d'une voiture électrique : la spécificité *électrique* de cette voiture est liée à son moteur, qui, dans ce modèle, est assimilé à un convertisseur. Cette modélisation et, en particulier, sa représentation par une chaîne énergétique, met en évidence que l'utilisation d'une voiture électrique ne résout pas le problème sociétal lié à l'utilisation des ressources énergétiques, qui concerne le « réservoir » à l'origine des conversions d'énergie associées au fonctionnement de la voiture – quelle que soit la nature de son moteur (F1B, 540-555).

Explication de l'usure d'une pile

Pour F1C, l'utilisation de chaînes énergétiques permet de comprendre certaines situations qui ne peuvent pas être expliquées par l'utilisation d'un autre modèle : le modèle électrocinétique, et sa représentation par des schémas électriques. Selon elle, le schéma électrique associé à un circuit électrique qui comporte une pile et une lampe est identique, que la pile soit chargée ou « morte » : il ne permet pas de comprendre pourquoi une pile s'use. À l'inverse, la chaîne énergétique permet de comprendre l'usure de la pile, la flèche sortant du réservoir « pile » indiquant que la pile s'use :

« la pile avec la lampe éclairée et un deuxième montage identique où la lampe n'est pas éclairée parce que la pile est morte / faire comprendre aux élèves que si on trace le circuit électrique donc on utilise le modèle électrocinétique / on va avoir une représentation identique pour les deux situations / et on ne peut pas expliquer pourquoi la pile va / s'user / alors que si on fait la représentation de la chaîne énergétique / eh bien on va bien voir qu'il y a quelque chose qui sort de la pile en fait / il y a un transfert qui vient de la pile / et donc il y a un moment où il n'y aura plus rien à sortir de la pile // donc c'est aussi une façon de montrer que // le modèle électrocinétique a des limites et que la modèle de l'énergie a un sens / dans certaines situations (silence 3 secondes) ce n'est pas tout à fait la réponse mais c'est une expérience qui me paraît importante // » (F1C, 102-111)

Ici, F1C compare les deux représentations, mais ne compare pas les deux modèles à proprement parler : selon nous, les modèles électrocinétique et électrochimique permettent de rendre compte de l'usure de la pile au cours du temps, par le calcul de l'évolution de grandeurs électrocinétiques et électrochimiques.

Limites du modèle

Après que les formateurs ont abordé le modèle scientifique scolaire qu'ils promeuvent, ils nous en ont présenté les limites (spontanément ou suite à un questionnement de notre part). Les limites données sont liées à l'impossibilité de cumuler les fonctions de réservoir et de convertisseur, à la

représentation des transformations d'énergie, et à l'utilisation de chaînes énergétiques exclusivement de type *pendant*.

F1A déclare que la manière dont elle définit les réservoirs et les convertisseurs induit une limite : celle de la présentation de situations dans lesquelles un objet cumule les fonctions de réservoir et de convertisseur. Elle donne plusieurs exemples pour illustrer ses propos :

- les états stationnaires, comme celui d'une lampe qui vient d'être allumée et, de ce fait, chauffe (élévation de l'énergie interne impliquant la fonction de réservoir) tout en effectuant une conversion (d'un transfert électrique en chaleur et rayonnement) (F1A, 359-365) ;
- les situations dans lesquelles le lieu de conversion et le lieu de stockage sont confondus (F1A, 269-271 ; 296-300) ;
- les situations où il y a débat sur la fonction d'un objet, comme une cellule (ou une pile, évoquée par tous les formateurs ; cf. ci-après) (F1A, 260-272).

F1A et F1C évoquent également les transformations d'énergie, c'est-à-dire les changements de forme d'énergie au sein d'un système. Elles considèrent que le modèle scientifique scolaire de l'énergie pour le collège ne les prend pas en considération ou, du moins, ne permet pas leur représentation (F1A, 264-266 ; 321-324 ; 316-320 ; 334-335 ; F1C, 70-86). F1C souligne que les transformations peuvent être modélisées et propose une représentation de ce type pour ses élèves de lycée, qu'elle juge inutile au collège (voir ci-avant).

Par ailleurs, au cours des entretiens, F1A et F1B ont mentionné la polysémie du mot « énergie », et notamment le fait qu'il revêt un sens différent selon les disciplines (en particulier, en SVT et en technologie). Selon F1A, les enseignants de SVT et technologie n'utilisent pas le même modèle scolaire de l'énergie que celui qu'elle nous décrit (F1A, 216-224). Elle ne considère pas ce dernier comme plus « légitime » que les autres : selon elle, il n'est pas utile aux enseignants des autres disciplines et reste spécifique à la physique-chimie (F1A, 229-230 ; 272-275 ; 279-280). F1B et F1C n'évoquent pas la possibilité que le modèle qu'ils proposent soit applicable ou transposable dans d'autres domaines disciplinaires. Nous en déduisons que ce modèle n'a pas de visée unificatrice (en dehors des domaines de la physique et de la chimie).

16.4. Place et statut de l'électricité

Au cours de nos entretiens, nous avons remarqué que les phénomènes électriques ont été abordés sous un angle particulier, c'est pourquoi nous avons choisi de détailler les choix des formateurs à ce sujet et la place qu'ils ont choisi de leur attribuer pendant la formation. Dans la partie précédente, nous avons déjà évoqué cette particularité à trois reprises : le choix d'un modèle initial qui ne prend pas en compte les phénomènes électriques, le statut des « transferts électriques », dont l'observabilité est différente de celle des autres transferts, et l'explication de l'usure de la pile, facilitée, selon F1C, par l'utilisation du modèle énergétique plutôt que du modèle électrocinétique.

Prise en charge des phénomènes électriques

F1A déclare qu'en début de collège, ses élèves associent systématiquement énergie et électricité :

« une première entrée c'est que je leur demande le mot énergie où est-ce qu'ils en ont entendu parler où est-ce qu'il y en a / et globalement **les petits sixièmes ils me disent il y en a dans tous les appareils électriques ils ne me parlent que d'électricité électricité électricité** / et si ils ont fait un peu de SVT en cycle quoi en primaire ils me parlent du Soleil // et puis c'est tout / **le reste l'énergie ça n'existe pas** » (F1A, 427-431)

F1A considère que, pour les élèves, avant enseignement, « l'énergie est électrique », et elle propose un enseignement qui « déconstruit » cette idée. Dans cette optique, elle ne mentionne aucun phénomène ni appareil électrique pendant toute la première année d'enseignement de l'énergie, ce qui la conduit à un germe de modèle scolaire où ne figurent ni les transferts électriques, ni les convertisseurs (F1A, 414-419).

F1B a un discours comparable à celui de F1A : il adopte la posture de F1A et juge particulièrement pertinente sa proposition de ne pas parler d'électricité en début d'enseignement de l'énergie. Selon lui, la confusion entre énergie et électricité est classique et concerne un public large (F1B, 663-675).

Nous avons vu précédemment que les transferts étaient souvent présentés comme « observables » par les formateurs, et en particulier par F1B et F1C, à qui nous avons demandé dans quelle mesure le travail électrique était observable. F1C précise qu'elle aborde les transferts électriques après avoir traité l'électrocinétique ; de ce fait, ses élèves « comprennent bien au moins qu'il y a de l'électricité qui circule / dans le circuit », puis elle ajoute qu'« **on ne voit l'électricité que par ce qu'elle provoque de la lumière ou du mouvement** ou quoi que ce soit ». Selon elle, cela ne dérange pas les élèves parce qu'ils peuvent « mesurer le courant donc quelque part ils savent que s'il y a du courant il y a de l'électricité » (F1C, 338-343).

De la même manière, lorsque nous demandons à F1B s'il considère que l'électricité est observable, il nous répond que :

« c'est observable à l'aide d'instruments de mesure // voilà je peux mettre un ampèremètre et dire / il y a de l'électricité // voilà / mais observable à l'œil non » (F1B, 637-640)

Il accorde un statut particulier aux transferts électriques, qu'il représente d'une manière différente des autres transferts sur sa carte conceptuelle de l'énergie (F1B, 638-645).

La pile : un objet particulier

Pendant les entretiens, les trois formateurs ont évoqué spontanément une difficulté liée au statut de la pile au sein du modèle qu'ils proposent, en posant la question : une pile¹⁴⁹ doit-elle être considérée comme un convertisseur ou comme un réservoir ?

Commençons par décrire brièvement la modélisation d'une pile selon les règles établies par les formateurs et énoncées précédemment. Dans ce modèle, identifier la pile comme un convertisseur reviendrait à considérer d'une part que la quantité d'énergie qu'elle contient ne varie pas, d'autre part qu'elle « reçoit » un mode de transfert qu'elle « convertit » en un autre mode de transfert, ce qui ne correspond pas au rôle d'une pile en fonctionnement « classique » au sein d'un circuit

149 En fonctionnement normal au sein d'un circuit électrique.

électrique : *a priori*, la quantité d'énergie qu'elle contient diminue, et elle ne reçoit pas particulièrement d'énergie. À l'inverse, identifier la pile comme un réservoir revient à considérer que la quantité d'énergie qu'elle contient varie au cours du temps, ce qui est cohérent avec son fonctionnement habituel. Dans ce modèle scientifique scolaire de l'énergie, la pile est donc un objet relativement simple à analyser d'un point de vue énergétique : on lui attribue la fonction de « réservoir ».

Or, des difficultés liées au statut de la pile ont été mises en avant par les trois formateurs pendant les entretiens et présentées comme particulièrement délicates.

Dans les extraits reproduits ci-après, les trois formateurs décrivent une confusion liée à l'opposition entre d'une part, la nature de l'énergie contenue dans la pile et dont la quantité diminue au cours du temps (énergie chimique), et d'autre part, la manière dont l'énergie est transférée à l'extérieur de la pile (travail électrique) ; nous avons souligné les expressions qui traduisent cette confusion. Nous avons mis en gras les propos qui décrivent les choix que les formateurs ont effectués afin de préciser la fonction qu'ils attribuent à la pile (cette fonction de réservoir reste, selon eux, un choix). Si F1A et F1C acceptent que d'autres enseignants considèrent la pile comme un convertisseur (ce terme prenant une signification différente de celui qu'il revêt dans le modèle qu'ils proposent), pour F1B, la pile peut être considérée à la fois comme un convertisseur et un réservoir en cohérence avec le modèle qu'il promeut.

« **il va falloir trancher donc on a tranché** / quand le réservoir stocke une forme d'énergie et en transfère une autre / typiquement la pile // c'est pour ça que la pile à un moment moi je peux entendre des collègues qui me disent mais moi je la vois plus comme un convertisseur parce que ce qui sort ce n'est pas ce qui est stocké / ouais mais je dis **moi vu la définition d'un réservoir et d'un convertisseur bah pour moi la pile c'est plus (+) un réservoir / parce qu'il y a stockage / et que j'ai défini le convertisseur comme un système qui ne stocke rien** // donc vous voyez là je vois / je vois bien que mon modèle je vais le clarifier / et que cette clarification fait que ça amène de la rigueur sur ma façon d'enseigner de la sixième à la troisième / mais m'amène des désaccords si un autre collègue me dit bah pour moi un convertisseur ça peut stocker un peu » (F1A, 301-310)

« après ce qui est compliqué mais ce n'est pas pour moi ce n'est pas une limite mais c'est ce qui m'amène des points de désaccord / c'est quand ce qui est transféré par un réservoir n'est pas ne correspond pas à la forme qui est stockée // on stocke de l'énergie chimique dans la pile / et ce qui est transféré c'est un transfert électrique / à part l'exemple de la pile batterie et ainsi de suite » (F1A, 335-339)

« si l'enseignant vient le définir comme il stocke une énergie / une forme d'énergie / qui est transférée ensuite vers l'extérieur / on voit bien que là si il met cette phrase il peut pas me définir la pile comme un réservoir / vu que ce qui est transféré vers l'extérieur du réservoir n'est pas ce qui est stocké // donc on voit bien qu'il a fallu réfléchir pour moi et tout ça c'est bien / moi je l'ai trouvé dans les papiers voilà que j'ai lus / un réservoir c'est un système qui stocke de l'énergie / point / qui stocke de l'énergie on s'arrête là » (F1A, 349-355)

« expliquer ce qui se passe dans une pile / moi je trouve que mon rectangle avec dedans / forme / bah énergie chimique / il y a un transfert électrique / et que il y a

encore un petit point je leur dis bah oui là il y a une ambiguïté vous avez douze mille questions à pourquoi il y a du chimique à l'intérieur et ça me fait de l'électrique à la fin bah tout ça / je leur dis vous irez en première en spécialité et vous me ferez de l'électrochimie / mais je ne peux pas vous dire voilà les transferts d'électrons qui se passent pendant cette transformation je ne peux pas » (F1A, 394-400)

« on représente plus les objets mais encore une fois on représente leurs fonctions / c'est très compliqué d'ailleurs c'est / c'est aussi un des messages qu'on essaye de faire passer dans la formation // je ne représente pas le moteur je représente la fonction du moteur // par exemple il y a un problème pour la pile / alors comment on représente une pile / alors ça **c'est l'éternel problème parce qu'on parce qu'elle a une double fonction de stock / de réservoir // et de convertisseur / donc il faut choisir faut faire un choix à partir du modèle / c'est de dire est-ce que je privilégie la fonction stockage ou est-ce que je privilégie la fonction convertisseur ? / bon / j'ai tendance à dire qu'on va privilégier la fonction stockage //** » (F1B, 564-572)

« d'ailleurs il y a chose que / aussi une autre question que j'ai eue et qui m'a beaucoup posé problème c'est / quand je suis rentrée en 2015 je me suis fait inspecter / sur en première S sur les piles // et **je me suis posé la question justement dans le modèle qu'on / qu'on propose sur la chaîne énergétique / comment on considère la pile / est-ce que c'est un convertisseur / est-ce que c'est un réservoir / comment et cætera / et donc là j'avais de nouveau envoyé un message à F1B qui m'avait dit bah en effet c'est très compliqué //** donc ça c'était une première cause c'est **le statut de la pile / qui est un problème je pense assez essentiel en collège en fait / qui en tout cas qui euh / qui mobilise des questions par rapport à sa représentation sur les chaînes énergétiques** » (F1C, 56-63)

Nous ajoutons toutefois que, plusieurs mois après notre entretien, nous avons recontacté F1C pour compléter nos données¹⁵⁰, et les précisions qu'elles nous a alors apportées ne font plus état de ces difficultés, considérées comme résolues :

« En fait, c'est sans doute la pile qui m'a permis de comprendre l'intérêt de ce modèle. J'ai l'impression que beaucoup de profs ont envie de dire que la pile est un convertisseur car elle "transforme de l'énergie chimique en énergie électrique". **J'ai été longtemps perturbée par l'idée que ce qui est stocké n'est pas de la même nature que ce qui sort.** cela donne envie de dire qu'il y a un convertisseur en jeu. **Cela demande donc de comprendre que c'est un transfert électrique et une forme chimique, deux choses très différentes donc** » (F1C, communication par courriel)

Les difficultés soulevées par les formateurs nous apparaissent liées à la fois à un manque de stabilité dans la définition des réservoir et convertisseur d'énergie, et à un manque de clarté dans la distinction entre les transferts d'énergie et les formes d'énergie. Le modèle qu'ils proposent, reposant sur une identification claire des transferts, des formes, des convertisseurs et des réservoirs d'énergie, devrait pourtant permettre une bonne prise en charge de ces difficultés.

150 La question qui a été posée à F1C est : « Tu as évoqué une difficulté concernant la manière dont on considère la pile (réservoir ou convertisseur), est-ce que tu peux me dire pourquoi on peut la considérer comme un convertisseur et pourquoi on peut la considérer comme un réservoir ? »

16.5. Un ensemble de choix menant à un modèle scientifique scolaire de l'énergie *parmi d'autres*

Pendant nos entretiens, F1A, F1B et F1C ont insisté sur le fait que le modèle qu'ils proposent résulte de choix, en le présentant comme un modèle particulièrement souple, ni dogmatique, ni figé.

Par exemple, F1A donne ses définitions de ce qu'est un convertisseur et de ce qu'est un réservoir, mais accepte que ses collègues choisissent et utilisent d'autres définitions, en contradiction avec la sienne, qu'elle ne présente pas comme meilleure ou plus efficace qu'une autre (F1A, 305-310 ; 349-360).

F1B évoque également des choix, dont il dit qu'ils seront exposés et justifiés pendant la formation (F1B, 171-177 ; 394-396). Puis, lorsqu'il discute du statut de la pile, il évoque le choix de « privilégier la fonction stockage » (F1B, 572), qu'il trouve plus pertinente que la fonction convertisseur, sans pour autant qu'il considère cette dernière comme incompatible avec ce modèle scientifique scolaire de l'énergie (F1B, 568-572).

Pour F1C, les formateurs proposent un modèle de l'énergie parmi d'autres, qui relève de choix « discutables » et qui ne se veut ni dogmatique, ni meilleur qu'un autre. Il a pour principale vertu d'apporter un cadre cohérent à un enseignement de l'énergie qui en manque (F1C, 198-204).

16.6. Conclusion

Le stage de formation à l'enseignement de l'énergie proposé par F1A, F1B et F1C a été initié par deux contraintes institutionnelles : d'une part, le changement de programme de 2015, qui impose aux enseignants de physique-chimie un enseignement de l'énergie aux Cycles 3 et 4 ; d'autre part, le constat par les formateurs d'un manque de clarté dans le modèle scientifique scolaire de l'énergie proposé par ces programmes et les manuels scolaires associés.

La motivation principale des formateurs est celle d'un partage d'expérience : en particulier, F1A suppose que les enseignants-stagiaires sont confrontés à des difficultés comparables à celles qui ont été les siennes. Les formateurs estiment que le modèle qu'ils utilisent est efficace, et ils souhaitent le présenter, le transmettre, voire *l'enseigner* aux enseignants-stagiaires. Les formateurs présentent ce stage comme *descendant*.

F1A et F1C ont un parcours professionnel en lien avec l'énergie similaire, marqué par des difficultés dans l'enseignement de l'énergie : par des échanges individuels avec F1B, elles ont toutes les deux « appris » le modèle scientifique scolaire de l'énergie auquel F1B forme des enseignants depuis longtemps, dont elles considèrent qu'il est le garant.

Ce modèle scientifique scolaire de l'énergie prend appui sur certaines caractéristiques de l'énergie en particulier : le stockage, les transferts et les conversions d'énergie, ainsi que sur des éléments spécifiques : les réservoirs et les convertisseurs d'énergie. Le modèle oppose formes d'énergie et transferts d'énergie, l'énergie en elle-même étant identifiée aux formes qu'elle peut prendre du fait de sa nécessité de stockage – dans ce modèle, les énergies lumineuse ou électrique n'existent pas. Le modèle comporte des chaînes énergétiques, qui représentent et distinguent les transferts, les convertisseurs et les réservoirs d'énergie, et qui permet de s'affranchir de la

dimension abstraite du concept d'énergie. La conservation et la dégradation de l'énergie ne sont pas au cœur de ce modèle.

Ce modèle est jugé particulièrement « bon » pour la compréhension et l'enseignement de l'énergie par les formateurs d'un point de vue personnel, en particulier par F1A et F1C, qui expriment clairement que sa connaissance et son utilisation leur ont permis une meilleure compréhension de ce qu'est l'énergie. Cependant, tous s'accordent à dire que ce modèle, qui repose sur des « choix », est particulièrement souple et n'a pas vocation à avoir un caractère prescriptif.

Enfin, nous avons mis en évidence que les phénomènes électriques présentent une singularité dans ce modèle : la progression proposée exclut ces phénomènes du début de l'enseignement, les transferts électriques sont considérés comme particuliers, l'attribution d'une fonction énergétique à la pile par les formateurs est délicate (alors que sa modélisation par le modèle qu'ils utilisent ne l'est pas).

17. Analyse du stage de formation F1

Le stage de formation académique F1, qui devait se tenir initialement au printemps 2020, puis au mois de janvier 2021¹⁵¹, s'est déroulé en avril 2021 dans une salle de classe d'un collège de banlieue. Il a duré six heures (quatre heures en matinée suivies de deux heures dans l'après-midi).

La séance a été enregistrée et découpée en 12 épisodes, brièvement décrits dans le Tableau 15 (la chronogénèse détaillée se trouve en annexe D).

Les lignes de transcriptions associées (en annexes A) sont numérotées et codées selon la norme : F1-numéro_d'épisode, numéro_de_ligne (par exemple, « F1-7, 162 » fait référence à la 162^e ligne de l'épisode 7 de la formation ; la notation « F1A, F1-7, 162 » précise que F1A est l'autrice des propos rapportés). Les lignes qui commencent par la lettre « S » correspondent aux interventions d'enseignants-stagiaires. Lorsque plusieurs enseignants-stagiaires interviennent au cours d'une discussion, nous les distinguons les uns des autres (S1, S2, etc.), mais sans identifier un individu en particulier à chaque abréviation¹⁵².

Cette formation a été précédée d'une rencontre préparatoire entre formateurs que nous avons transcrite. Les lignes de transcriptions de cette rencontre (en annexe A) sont numérotées et codées selon la norme : RP-F1, numéro_de_ligne (« RP-F1, 162 » fait référence à la 162^e ligne de la rencontre préparatoire ; la notation « F1A, RP-F1, 162 » précise F1A est l'autrice des propos rapportés).

Dans ce chapitre, nous allons caractériser le ou les modèles scientifiques scolaires proposés (approche épistémologique) et décrire et analyser la séance de formation (approche didactique).

Nous commençons par décrire le déroulement général de la formation et celui de la rencontre préparatoire, auxquels nous ferons référence pendant nos analyses.

17.1.Présentation générale de la formation

Rencontre préparatoire

Nous avons effectué une chronogénèse de la rencontre préparatoire (Tableau 13) en vue de repérer :

- ce qui concerne les tâches prévues à destination des enseignants-stagiaires ;
- ce qui concerne les tâches prévues à destination des élèves ;
- les discussions relatives au modèle scientifique scolaire de l'énergie ;
- les discussions relatives au concept scientifique d'énergie.

151 Ces deux séances ont été annulées en raisons des restrictions liées à la pandémie de Covid-19.

152 D'une part, les enregistrements vidéos sont centrés sur les formateurs, ce qui ne permet pas l'identification des enseignants-stagiaires ; d'autre part, cette identification n'est pas utile pour notre travail, qui se focalise sur les formateurs.

Épisodes	Contenu	Durée	Transcription
1	(la rencontre débute sans F1B) bilan des formations précédentes	00:01:21	1-22
2	quelle activité supprimer pour gagner du temps (« débat mouvant » / « post-it »)	00:03:01	23-61
3	activité « étiquettes »	00:08:39	62-137
4	« apports théoriques » (quoi enlever ?)	00:07:09	138-245
5	arrivée de F1B	00:00:00	246
6	décisions concernant les premières activités (débat mouvant / post-it)	00:05:42	246-320
7	activité « étiquettes » (récapitulatif)	00:00:34	321-331
8	« apports théoriques » (quoi enlever ?)	00:05:17	338-419
9	activité « QCM »	00:00:31	420-427
10	« apports théoriques » (quoi enlever ?)	00:06:34	428-513
11	activité « étiquettes » (question de la correction de l'activité)	00:04:56	513-591
12	discussions photocopies	00:01:00	592-606
13	discussion sur l'animation Colorado	00:00:55	607-620
14	activité « QCM »	00:01:05	622-642
15	activité « exercice moteur »	00:02:10	643-675
16	activité « chaînes énergétiques »	00:01:07	676-697
17	modèle scientifique scolaire de l'énergie	00:05:30	698-773
18	activité « chaînes énergétiques »	00:06:14	774-881
19	progression et exemples d'activités par niveau	00:14:29	881-1084
20	choix didactiques, limites et difficultés (liés à la chaîne)	00:03:26	1085-1139
21	progression, « activités phare »	00:08:26	1140-1275
22	obstacles et difficultés (liés à la chaîne)	00:04:24	1276-1340
23	vérification de l'ensemble du déroulé	00:01:51	1341-1367

Tableau 13: chronogénèse de la rencontre préparatoire à la formation F1

Pendant la rencontre préparatoire, le modèle scientifique scolaire de l'énergie n'a jamais été explicité et les chaînes énergétiques n'ont pas été mentionnées – ni partagées à l'écran. D'une façon générale, cette rencontre avait un objectif organisationnel et ne portait pas sur les contenus théoriques et scientifiques de la formation. Cependant, nous avons repéré deux ensembles de discussions concernant les contenus :

- l'évocation de la place de l'électricité (et de la lumière) dans le modèle (épisodes 8, 19 et 20) ;
- des débats concernant la compréhension du contenu des « éclairages théoriques » proposés pendant la formation (épisodes 4, 8 et 10).

Synopsis général prévu

Lors de leur rencontre préparatoire, les formateurs ont pris appui sur le déroulé du stage qui avait eu lieu deux ans auparavant, auquel ils ont apporté des modifications pour construire une nouvelle version de cette formation. Le nouveau document obtenu figure en annexe (annexe D).

Selon ce document, dont nous proposons un résumé dans le Tableau 14, la formation est composée de 11 parties, entrecoupées de deux pauses.

Épisodes prévus	Tâches dévolues aux enseignants-stagiaires prévues	Contenu prévu	Durée prévue (minutes)
1	1	« débat mouvant » entre enseignants-stagiaires au sujet de l'énergie, considérée comme « un sujet plus difficile que les autres à APPRENDRE et à ENSEIGNER »	10
2	2	activité permettant aux enseignants-stagiaires de se positionner par rapport au concept scolaire d'énergie	10
3	3	activité autour du vocabulaire associé aux phénomènes énergétiques	40
4		« éclairages théoriques » relatifs au concept d'énergie et à l'enseignement de l'énergie	60
<i>pause (durée prévue : 15 minutes)</i>			
5	4	QCM autour du vocabulaire lié à l'énergie et au modèle scientifique scolaire proposé par les formateurs (qui ne mentionne pas les chaînes énergétiques) (tâche 4) suivi d'un discours introductif au « modèle de l'énergie »	30
6	5	exercice d'application pour les enseignants-stagiaires : « utilisation d'un modèle de l'énergie »	25
7	6	les enseignants-stagiaires sont amenés à « faire des chaînes énergétiques »	40
<i>pause déjeuner (durée prévue : une heure)</i>			
8	6	correction des chaînes énergétiques	20
9		« présentation des programmes » de Cycle 3, Cycle 4 et lycée	NR
10	7 ?	proposition et choix « didactiques » de progression, proposition d'une « activité phare par niveau »	NR
11		conclusion « obstacles et difficultés » (sous réserve de temps suffisant)	NR

Tableau 14: synopsis prévu pour la formation F1

Déroulement général de la formation

Après avoir assisté au stage de formation, nous avons effectué une chronogénèse de l'ensemble du stage (en annexe D), dans laquelle nous avons repéré 12 épisodes différents, eux-mêmes composés de plusieurs sous-épisodes. L'objectif de ce découpage est de faciliter notre analyse de formation ; il ne répond pas à des normes rigides, mais permet un repérage chronologique, directement lié aux tâches proposées aux enseignants-stagiaires et à l'activité des formateurs.

Le Tableau 15 ci-après permet d'avoir un aperçu global de la formation. Il présente l'ensemble des épisodes et leur durée, et précise dans quel épisode les tâches prévues ont eu lieu.

N° de l'épisode	Durée	Contenu	Identification des tâches
1	21'40''	introduction de la formation	1,2
2	28'06''	tâche « étiquettes »	3
3	56'06''	éclairages théoriques	3 (correction)
4	36'30''	quiz vocabulaire	4
5	34'43''	difficultés liées à l'enseignement-apprentissage de l'énergie	
6	31'57''	modèle scientifique scolaire de l'énergie pour le collège	5
7	35'53''	chaînes énergétiques	6
8	23'36''	points de vigilance	
9	26'47''	programmes et progressivité des enseignements liés à l'énergie	
10	12'23''	activité « battle schéma électrique / chaîne énergétique »	7
11	15'57''	activité « défi : de l'énergie en bouteille »	7
12	15'43''	activité « la pile s'use »	7

Tableau 15: chronogénèse synthétique de la formation F1

L'ensemble des tâches prévues d'après notre analyse *a priori* ont été proposées pendant la formation, dans l'ordre attendu. Nous proposons une analyse didactique de ces tâches¹⁵³, d'un point de vue cognitif (description et analyse du contenu de la tâche) et d'un point de vue médiatif (comment a-t-elle été mise en œuvre pendant la formation ?)

Avant de présenter cette analyse, nous décrivons le modèle scientifique scolaire de l'énergie effectif présenté pendant la formation – puisque la plupart des tâches proposées pendant la formation le mettent en jeu.

17.2. Caractérisation du modèle scientifique scolaire proposé

Pour mettre en évidence le modèle scientifique scolaire de l'énergie proposé pendant cette formation, nous relevons et explicitons l'ensemble des caractéristiques de l'énergie présentées par des formateurs pendant la formation, les éléments spécifiques au modèle – réservoirs et convertisseurs d'énergie, chaînes énergétiques – ainsi que les limites du modèle et de sa représentation.

Nous prenons en considération à la fois les propos tenus par les formateurs et le contenu des diapositives qui ont été projetées¹⁵⁴.

Le modèle proposé s'appuie fortement sur la distinction entre formes et transferts d'énergie, c'est pourquoi les paragraphes qui décrivent ces deux caractéristiques sont particulièrement détaillés.

Caractéristiques de l'énergie

Dans ce paragraphe, nous exposons l'ensemble des caractéristiques de l'énergie qui ont été mentionnées pendant la formation, en précisant quel sens (voire quelle définition) a été attribué à chacune d'entre elles, et quelles sont celles qui sont associées explicitement au modèle scientifique scolaire de l'énergie proposé pendant la formation F1.

153 Notons que, puisque les activités-élèves (tâche 7) ont été présentées aux enseignants-stagiaires comme des tâches qu'ils étaient amenés à effectuer, elles seront analysées de la même manière que les autres tâches.

154 Certaines diapositives ont été intégrées au chapitre et aux transcriptions ; nous n'avons pas jugé utile de faire figurer l'intégralité du diaporama en annexes.

Une grandeur abstraite

Pendant cette formation, l'énergie est présentée comme une grandeur (on peut lui attribuer une valeur et une unité) abstraite : c'est une « grandeur physique » (F1B, F1-3, 151), « ce qui quantifie / les transformations (...) c'est // comment je compte // pour les comparer / les transformations » (F1B, F1-3, 145-147). L'énergie est un « nombre abstrait (mesuré par une unité compliquée) » (F1-3, diapo 16), « quelque chose qui est beaucoup plus abstrait qu'on ne voit pas // qui permet de quantifier ce qui a permis ces transformations » (F1B, F1-3, 275-277).

Puissance

La puissance n'est pas définie et ne fait pas l'objet d'une partie spécifique de la formation, mais elle y est mentionnée à plusieurs reprises.

Elle est évoquée dans le 5^e épisode comme une grandeur mentionnée dans les médias sans être comprise par les journalistes (F1B, F1-5, 181-184).

À plusieurs reprises, les formateurs soulignent qu'elle doit être associée à des transferts et non à des objets (F1C, F1-6, 292-293 ; F1A, F1-6, 301-303 ; F1B, F1-8 326-327).

Les formateurs associent essentiellement la puissance à des transferts liés au fonctionnement d'un appareil électrique¹⁵⁵.

Ils précisent qu'il est possible d'indiquer des valeurs de puissance sur les flèches de chaînes énergétiques, éventuellement en jouant sur leur épaisseur (F1A, F1-6, 305-312).

Conservation de l'énergie

Pour F1B, la conservation de l'énergie est la propriété indispensable pour définir l'énergie :

« le mot que j'aurais mis sur mon post-it // voilà // le seul mot que j'aurais vraiment obligatoirement mis sur moi c'est conservation » (F1B, F1-3, 68-70)

Il en parle longuement dans l'épisode 3 (*éclairages théoriques*) notamment en mentionnant et/ou en citant Feynman (F1-3, 73-86), Jancovici (F1-3, 151-153), d'Espagnat (F1-3, diapos 15 et 16).

Par la suite, il explique que le principe de conservation de l'énergie n'est pas « opératoire » (F1B, F1-3, 315-316) parce que :

« si on cherche bien le seul système isolé de tout // c'est l'univers // par définition de l'univers (...) s'il y a transformation // c'est qu'il y a échange d'énergie // donc ça veut dire que les systèmes qu'on étudie ils échangent tous de l'énergie avec d'autres systèmes // donc leur énergie ne se conserve pas / puisqu'ils en donnent » (F1B, F1-3, 181-202)

Ici, F1B met en avant le fait qu'*une forme d'énergie* ne se conserve généralement pas : l'énergie interne associée à un système particulier. Il ajoute que :

« la version opératoire du principe de conservation de l'énergie // c'est dire // pour un système donné // sa variation d'énergie est égale à tout ce qui est reçu et donné » (F1B, F1-3, 227-229)

¹⁵⁵ Dans l'épisode 5, la puissance d'un cycliste (F1-5, 215-227) est évoquée, mais sans que les formateurs utilisent le mot « puissance » (F1B, F1-5, 224 : « bon il crache quand même / entre 700 et 800 watts le gars »).

La conservation de l'énergie sera mentionnée à quelques reprises dans la suite de la formation, en lien avec les chaînes énergétiques et sous un angle local ; nous y reviendrons par la suite.

Dégradation de l'énergie

La dégradation de l'énergie ne fait pas partie des connaissances visées pendant cette formation. On note une remarque marginale de F1B à ce sujet :

« on ne fait jamais de distinction dans la vie courante avec l'entropie // autant l'énergie est un mot très courant // autant l'entropie qui est en thermodynamique un concept aussi fondamental que l'énergie / qui va dire que finalement / il y a deux grands types d'énergies // et qu'il y en a un qu'on dégrade / et d'autres qu'on ne dégrade pas en fait dans les formes d'énergie // c'est le second principe // bah on ne fait pas cette distinction et donc / on est un peu // embêtés dans la vie courante » (F1B, F1-5, 98-103)

Les pertes d'énergie sont rarement évoquées ; elles ne sont ni définies, ni mises en regard de la dégradation de l'énergie (F1-6, 269-276 ; F1-6, fiche « modèle de l'énergie ») ; on ne relève aucune occurrence pour les mots *dissipation* et *dégradation*.

Transferts d'énergie

Pendant la formation, les transferts d'énergie sont présentés comme des déplacements ou des échanges d'énergie entre deux systèmes :

« **un transfert / c'est / un passage / d'une énergie // enfin d'énergie // d'un lieu alors d'un lieu / plus ou moins diffus // à un autre // voilà // sans stockage // donc / c'est / vous voyez que je commence à on commence à construire des choses que vous faites hein des chaînes énergétiques // une flèche / ça veut dire qu'il y a de l'énergie qui passe // qui passe d'un endroit à un autre // ou d'un système à l'autre** » (F1B, F1-3, 253-258 ; voire aussi F1-3, 298 ; F1C, F1-6, 89-91)

Les différents types de transferts – modèle scientifique de l'énergie

Lors des apports théoriques (épisode 3), F1B distingue deux types de transferts : le *travail* et les *transferts thermiques*, comme le montre la citation suivante, qui reprend la distinction faite sur la diapositive 42 :

« leur variation / c'est les flux // et là où on distingue et je pense que vous avez des souvenirs de thermo // bah c'est qu'on distingue / les travaux / et // les transferts thermiques » (F1B, F1-3, 508-510)

Cette double catégorisation est reprise vers la fin de la formation :

« si c'est un transfert / c'est soit un travail / premier principe hein // c'est soit un travail soit un transfert thermique » (F1B, F1-8, 155-156)

Cependant, dans l'épisode 4, le rayonnement est considéré comme un troisième type de transfert, distinct de la chaleur (F1B, F1-4, 32-33 ; F1B, F1-4, 35-52 ; F1B, F1-4, 56-58 ; F1B, F1-4, 132-134).

Ni le travail, ni les transferts thermiques, ni le rayonnement ne sont définis pendant la formation (les transferts thermiques sont identifiés à la chaleur, qui n'est elle-même pas définie). L'électricité

est définie comme « un travail // électrique // de niveau microscopique » (F1-3, 518), et une diapositive (F1-3, diapo 42) donne des indications concernant « Q » et « W », qui ne sont pas commentées oralement :

« Q : Non nulle si le système échange de l'énergie avec l'extérieur sans agir mécaniquement sur lui, par conduction thermique, rayonnement ou convection. »

« W : ? Travail des forces non conservatives. »

Les transferts du modèle scientifique scolaire de l'énergie pour le cycle 4

Dans un contexte d'enseignement, les formateurs évoquent quatre types de transferts d'énergie (en cohérence avec les travaux de recherche en didactique mentionnés au §3.1) : le travail électrique, le travail mécanique, la chaleur et le rayonnement, appelés transfert électrique, transfert mécanique, transfert thermique et transfert par rayonnement (F1-6, fiche « modèle de l'énergie » ; F1C, F1-6, 82-83).

F1B évoque la possibilité de distinguer deux types de transferts mécaniques : le transfert mécanique « linéaire » et le transfert mécanique « de rotation », qu'il associe respectivement à un déplacement linéaire et à un déplacement circulaire (F1B, F1-7, 286-294).

Des transferts présentés comme « observables »

Nous avons reproduit les propos tenus par F1B pour l'introduction à la modélisation et au modèle scientifique scolaire de l'énergie pour le cycle 4 (Texte 3), ainsi que les diapositives projetées pendant ce discours (Figure 126, Figure 127, Figure 128).

F1-6, 15-51, F1B : (*diapo 63*) // bon / vous quand vous mettez vos lunettes // de prof de physique // en fait vous mettez des lunettes qui vous permettent de modéliser vous voyez tout ça quand on vous parle d'énergie // ce qu'on voit n'a rien à voir avec tout ça // a priori objectivement // (*diapo 64, partie de gauche uniquement – sans les bulles bleues et leurs commentaires*) voilà / ça n'a rien à voir // et en fait ce qu'on fait c'est / on fait faire ça (*il désigne la double-flèche*) à nos élèves tout le temps / ça peut valoir le coup / alors vous verrez que / ça vaut tellement le coup que / là aussi // ça a été poussé très loin dans les séquences qu'on va vous proposer c'est-à-dire qu'on explicite ce qu'on fait faire aux élèves du point de vue de la modélisation et des deux mondes (*affichage de la bulle « Les observables correspondent à des transferts ou à des objets »*) // mais par exemple // on en a parlé ce matin // quels sont les socles sur lesquels on peut s'appuyer pour un enseignement de l'énergie / dans le monde matériel (*il désigne l'encart du bas et la bulle du bas*) essayer d'oublier les stocks // mais / penser aux transferts // ou aux objets courants // pour lesquels / il est évident pour les élèves qu'il y a de l'énergie en eux // voilà (*affichage de la bulle « Les lois/principes sont consubstantiels de la définition »*) // évidemment / là il y aura des lois et des principes / des mots / quand on parle des mots / de normer le vocabulaire on est plutôt là-dedans (*il désigne l'encart du haut et la bulle du haut*) // voilà // mais / il n'y a pas de correspondant observable à l'énergie stockée (*affichage de la bulle « Faire du lien nécessite d'observer des transferts »*) // et donc // **passer à des choses qui sont non-observables / abstraites / qui norment qui sont des lois // à des choses qu'on observe eh bien ça nécessite d'observer préalablement d'abord les transferts et de parler d'abord des transferts dans un début d'enseignement sur l'énergie** // nous on défend l'idée qu'il faut d'abord aller attaquer les transferts avant d'aller aborder les formes d'énergie stockée (*diapo 65, affichage des bulles de gauche « Des transferts », « Des événements », de la flèche qui les relie et de la phrase « Pour modéliser, il faut s'appuyer sur les transferts... »*) // voilà // il faut s'appuyer sur les transferts alors en français on dirait (*il fait apparaître « Ça chauffe », « Ça brille », « Ça bouge » et « électricité »*) ça // en fait il n'y en a pas trente-six des transferts hein // celui-là (*il indique « électricité »*) est un peu à part parce que / voir qu'il y a d'électricité c'est pas simple // on essaye de faire en sorte avec les élèves ne voient pas trop qu'il y ait de l'électricité parce que ça veut dire qu'ils ont touché un truc et qu'ils ont pris une / une décharge // donc voir l'électricité alors / oui on est bien sûr on va mettre un ampèremètre et / OK // vous voyez que quand on met un ampèremètre on est déjà passé // un peu dans le monde théorique parce qu'un instrument de mesure c'est quoi c'est prendre de l'information sur le réel et // dire une grandeur physique // bon / mais en gros c'est ça les transferts / il n'y en a pas trente-six // (*il fait apparaître « Transfert thermique », « Rayonnement », « Travail mécanique » et « Travail électrique »*) et quand vous les modélisez vous en dites ça // c'est-à-dire que vous normez le vocabulaire // vous voyez que nous on défend // alors travail mécanique vous pouvez mettre / transfert mécanique // et transfert électrique au collège vous n'êtes pas obligés de parler de travail // voilà / donc ça nous on dit / au lycée on dit ça / et là vous pouvez mettre transfert mécanique transfert électrique ça ira très bien // travail / vous pouvez vous en passer (*diapo 66*)

Texte 3: transcription des propos d'introduction à la modélisation et au modèle scientifique scolaire de l'énergie pour le Cycle 4

Une vigilance accrue pour la modélisation

Apprendre à regarder le monde avec des lunettes énergétiques

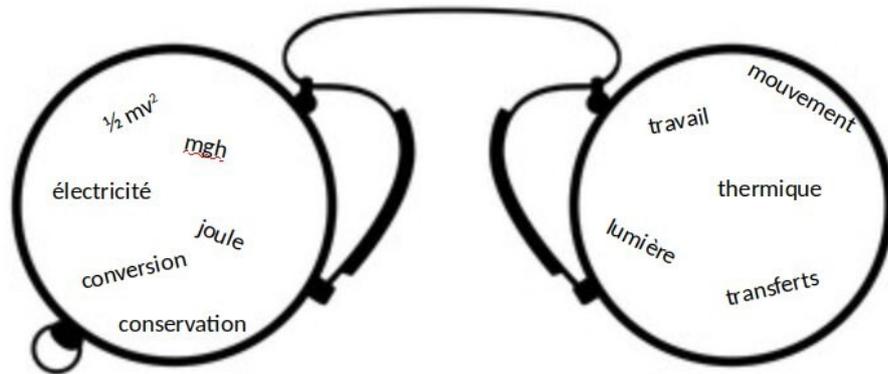


Figure 126: formation F1 - copie d'écran de la diapositive 63

Une vigilance accrue pour la modélisation

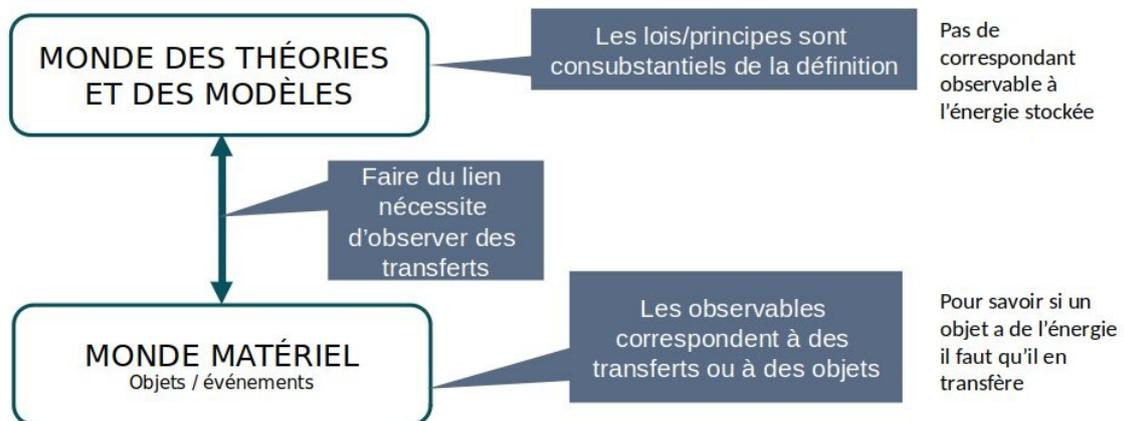


Figure 127: formation F1 - copie d'écran de la diapositive 64

Une vigilance accrue pour la modélisation

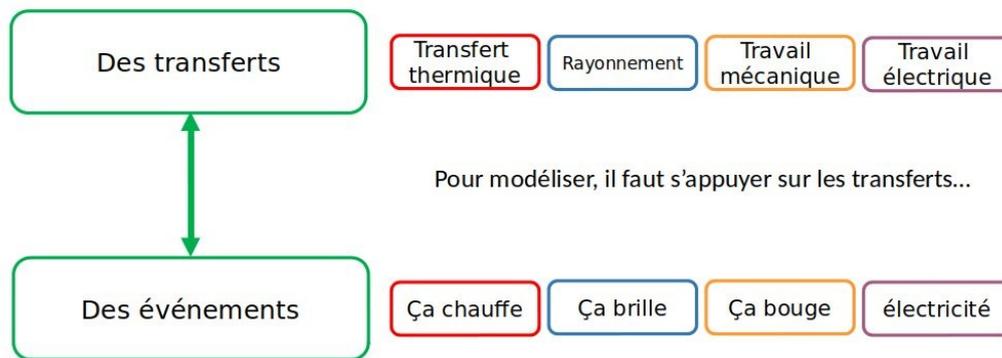


Figure 128: formation F1 - copie d'écran de la diapositive 65

Dans cette partie de la formation, F1B fait explicitement référence à la modélisation et à la théorie des deux mondes (F1B, F1-6, 20-21). Les transferts sont présentés comme appartenant à la fois au monde matériel et au monde des théories et des modèles, et permettant de passer d'un monde à l'autre (en particulier, voir diapo 64 – Figure 127 : « Les observables correspondent à des transferts ou à des objets » ; « Faire du lien nécessite d'observer des transferts »).

À l'inverse, dans la diapositive 65 (Figure 128, décrite dans F1-6, 15-51), les transferts semblent présentés comme appartenant au monde des théories et des modèles, et sont identifiés directement à des événements : l'événement « ça chauffe » est associé au « transfert thermique », l'événement « ça brille » est identifié au « rayonnement », l'événement « ça bouge » est identifié au « travail mécanique » et l'événement « électricité » est identifié au « travail électrique ».

Comme dans le chapitre précédent, nous nous posons la question de la signification des événements décrits. Si « ça chauffe » fait référence à un objet dont la température augmente, alors cet événement est associé à une augmentation de l'énergie interne d'un système, et non à un transfert thermique. Associer l'événement « ça brille » au rayonnement le limite à la lumière visible (pas de prise en compte de l'UV / IR) ; par ailleurs, dans le langage courant, l'expression « ça brille » fait référence à un objet qui brille et non à la lumière qu'il émet. Le fait d'associer un objet en mouvement (« ça bouge ») à un travail mécanique est également problématique : en particulier, un objet ayant un mouvement rectiligne uniforme peut difficilement être associé à une variation d'énergie et à un travail mécanique. Enfin, considérer l'électricité comme un événement « observable », au même titre que le fait de chauffer, briller, bouger (verbes d'action associés à des objets) pose question, ce que F1B relève également – il considère que l'utilisation d'un ampèremètre pallie cette difficulté.

Nous notons aussi que les changements d'état, étudiés au Cycle 4, ne sont pas pris en considération dans cette classification (à moins de les associer à l'événement « ça bouge », modélisé par un travail mécanique).

Distinction entre formes et transferts d'énergie¹⁵⁶

Pendant cette formation, les formes d'énergie ou l'énergie sont présentées comme exclusivement stockables, et opposées aux transferts d'énergie (F1B, F1-4, 180-182 ; F1C, F1-6, 89-91).

Suite à une remarque d'un enseignant-stagiaire, F1B précise que ce sont les formes d'énergie – et non l'énergie – qui sont stockées, par opposition aux transferts d'énergie, auxquels il n'est pas possible d'attribuer de formes (F1B, F1-6, 197-205).

Formes d'énergie

Classifications « scientifiquement valides » et définition des formes d'énergie

Les formateurs énoncent et projettent les différentes formes que peut prendre l'énergie, sans les définir (F1-3, diapo 41 ; F1-5, 377-378 ; F1-5, diapos 59-60). Il s'agit des :

- énergie macroscopique cinétique ;
- énergie macroscopique potentielle ;
- énergie microscopique cinétique ;
- énergie microscopique potentielle.

Une autre classification théorique est proposée (F1-3, 464-484 ; F1-3, 505-508 ; F1-3, diapo 42), qui distingue les énergies cinétique, potentielle et interne :

« toutes les formes d'énergie sont là [ΔE_c , ΔE_p , ΔU] / il y en a pas d'autres // alors il y a des des E_p il y a d'autres // il y en a plein // élastique // de pesanteur et cætera // dès qu'il y a une force conservative // mais il n'y a pas d'autres formes d'énergie que ces trois-là » (F1B, F1-3, 505-508 ; diapo 42)

Ces deux classifications ne sont pas mises en regard l'une de l'autre.

Les formes d'énergie sont partiellement définies : d'après la citation précédente, les énergies potentielles sont associées aux forces conservatives ; d'après les citations suivantes (essentiellement issues d'une diapositive projetée, sans avoir été lue et discutée), l'énergie interne est liée – entre autres – à la composition chimique et à la température du système, l'énergie cinétique est associée à la vitesse du système et l'énergie potentielle est associée à la position d'un système dans un champ de force :

« dans le delta U il y a aussi du mu zéro n i / potentiel standard chimique » (F1B, F1-3, 520-521)

¹⁵⁶ À ce sujet, nous rapportons ici un extrait des discussions ayant eu lieu lors de la rencontre préparatoire. F1A et F1C ont commencé cette rencontre seules, et ont passé en revue le diaporama pour déterminer ce qui pouvait être enlevé afin de gagner du temps. Certaines diapositives de la partie théorique (épisode 3) relatives au « lien entre la mécanique de Newton et l'énergie » leur ont paru superflues (FP-F1, 191-224). À l'arrivée de F1B, elles lui ont proposé de supprimer ces diapositives. Après réflexion (RP-F1, 355-381), les trois formateurs les ont considérées comme non nécessaires, voire inutiles. Puis, en lisant les commentaires associés à ces diapositives (RP-F1, 397-400 : « Insister sur le fait que E_c est l'énergie stockée par le système du fait de son mouvement (contrairement à E_p qui est un transfert entre le système et l'extérieur !) Peut-être prévenir les collègues que cette interprétation n'est pas tout à fait consensuelle... »), F1B s'est souvenu qu'elles pouvaient être présentées comme une justification scientifique à la distinction entre stocks et transferts (F1B, RP-F1, 382-384 : « mais // mais // non si / je sais pourquoi ça y est // l'idée était de dire que quand même distinguer les stocks et les transferts c'était quelque chose qui était fondé scientifiquement »). Sans plus de discussions, les trois formateurs ont alors jugé nécessaire de garder l'ensemble de ces diapositives.

ΔE_c : « Non nulle si la vitesse du système varie. » (F1-3, diapo 52)

ΔE_p : « Non nulle si la position du système varie et si celui-ci est dans un champ de force. » (F1-3, diapo 52)

ΔU : « Non nulle si les propriétés microscopiques du système varient (température, composition chimique, etc.) » (F1-3, diapo 52)

Classifications des formes d'énergie pour l'enseignement

Les formateurs proposent ensuite une autre classification, « par les domaines de la physique », dans laquelle l'énergie peut être « mécanique, thermique, électrostatique, chimique, nucléaire » (F1-5, diapo 59 ; diapo 60). Cette classification est plus ou moins reprise dans la fiche *Modèle de l'énergie* (F1-6), où il est écrit :

« On distingue quatre formes d'énergie : **énergie chimique** (énergie dans la matière qui peut être transformée), **énergie mécanique** (énergie d'un objet en mouvement ou qui peut tomber), **énergie thermique** (énergie que possède un objet du fait de sa température), **énergie nucléaire** (énergie dans le noyau d'un atome qui peut se désintégrer) » (F1-6, fiche « modèle de l'énergie »)

F1B explique brièvement dans quelle mesure les formes d'énergie du modèle scientifique scolaire de l'énergie sont identifiables aux formes d'énergie du modèle scientifique de l'énergie :

« si vous croisez cinétiques et potentielles vous avez / vous êtes capables de classer toutes les formes d'énergie // alors par exemple après on peut croiser // l'énergie chimique / c'est une énergie / potentielle // microscopique // l'énergie cinétique / qui fait partie de la mécanique c'est une énergie / euh / bah // cinétique macro // et cætera et cætera » (F1B, F1-5, 379-383)

Les formes d'énergie et leur description sont globalement cohérentes avec la manière dont les formes d'énergie sont abordées d'un point de vue didactique (§3.1), mais ne permettent pas la distinction entre les formes cinétique et potentielle de l'énergie (elles ne sont pas distinguées au sein de l'énergie mécanique). Par ailleurs, nous remarquons que cette classification ne permet pas de modéliser simplement les changements d'état, qui font l'objet d'un apprentissage au Cycle 4.

Notons que les énergies électrique et lumineuse ont été évoquées, mais les difficultés techniques liées au stockage de ces formes d'énergie conduisent F1B à ne pas les prendre en considération (F1B, F1-5, 257-271 ; F1B, F1-5, 276-279).

Conversions et transformations d'énergie

Pendant la formation, F1B définit les conversions et les transformations d'énergie en leur donnant un sens conforme à celui que nous leur attribuons. Nous reproduisons ci-après ses propos, ainsi que la diapositive projetée pendant ce discours (Figure 129) :

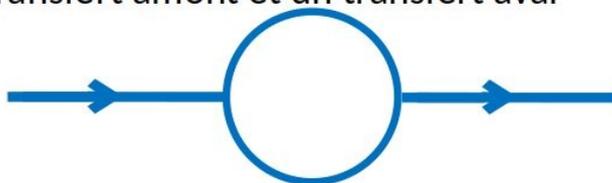
« alors maintenant conversion ou transformation ça c'est aussi un vieux débat // sur lequel les didacticiens ont pas mal travaillé // pour nous ce qu'on vous propose c'est de dire que la conversion ça concerne des transferts // donc il y a conversion quand j'ai un transfert et un transfert (*il désigne les flèches de part et d'autre du cercle sur la diapo*) / ou plusieurs // voilà // et // il y a transformation quand au sein d'un système // et vous

voyez à quel point j'utilise déjà le formalisme des chaînes énergétiques // au sein d'un système qui stocke de l'énergie // la forme sous laquelle c'est stocké change // donc si je lâche un objet (*il lève sa main droite, dans laquelle se trouve la télécommande*) // le réservoir est un réservoir d'énergie potentielle initialement // et // la frontière ici (*il désigne la barre horizontale qui sépare les deux parties du rectangle bleu, en bas de la diapo*) // eh bien // va remonter // remonter remonter remonter jusqu'à ce qu'il n'y ait plus d'énergie potentielle et que son stock / soit devenu de l'énergie cinétique // donc ça c'est la transformation / littéralement transformation c'est changement de forme // donc si vous n'êtes pas capable de dire // de quelle forme à quelle forme vous êtes passé c'est que probablement ce n'est pas une transformation // donc conversion » (F1B, F1-3, 273-277)

Conversion ou transformation ?

La conversion concerne les transferts :

un transfert amont et un transfert aval



Littéralement la transformation est le changement de *forme* au sein d'un réservoir.



Travaux de l'énergie en cycle 3 et 4 - 14 avril 2022

Figure 129: formation F1 - copie d'écran de la diapositive 22

F1B justifie l'usage de ces mots en faisant référence à des travaux de didactique.

Par la suite, les « convertisseurs » seront présentés comme des dispositifs ou des systèmes qui peuvent modifier un mode de transfert ; nous y reviendrons par la suite.

Les transformations d'énergie telles que nous les entendons n'ont pas été mentionnées à d'autres moments de la formation comme appartenant au modèle scientifique scolaire utilisé par les formateurs¹⁵⁷.

¹⁵⁷ Elles ont été évoquées à deux reprises par F1C, qui souligne qu'elles ne peuvent pas être représentées par les chaînes énergétiques : « encore une fois si on est dans une transformation énergie cinétique énergie potentielle la chaîne / aucune utilité / non » (F1C, F1-8, 6-7) ; « c'est la transformation (...) qui reste interne au système et donc là c'est une des limites des chaînes c'est qu'on ne voit pas cette / cette transformation » (F1C, F1-7, 274-277).

Par ailleurs, F1B utilise parfois le mot *transformation* dans son sens commun (F1B, F1-3, 144-148 ; F1B, F1-3, 219-220 ; F1B, F1-5, 161-164).

Éléments spécifiques au modèle scientifique scolaire proposé

Dans ce modèle, une « fonction énergétique » est attribuée aux différents objets pris en considération, comme le montrent les expressions mises en gras dans les citations suivantes :

« j'ai fait exprès de prendre pile bien / pile bouton bien ronde // si vous la dessinez c'est un rond // si vous voulez la modéliser / bim // c'est un rectangle // c'est quand même le grand écart hein // voilà alors par contre le moteur il est cylindrique et puis vous le dessinez comme un / un cercle ça va mieux // donc il ne faudrait pas croire que évidemment c'est / c'est / c'est pour ça qu'on dessine un cercle / mais en fait **ce qu'on représente là ce n'est pas du tout les objets / ce sont leurs fonctions énergétiques** » (F1B, F1-6, 53-58)

« travailler sur les chaînes énergétiques c'est prendre des objets et épurer complètement // et **dire quelle est leur // fonction // du point de vue // de l'énergie** » (F1B, F1-6, 60-61)

« oui oui / non mais là vous voyez pour **les convertisseurs il y en a un qui est lié au haut-parleur** il y en a **un qui est lié** bah // à à la LED euh **à des DEL** / et euh le thermique » (F1A, F1-7, 116-118)

« (*affichage du deuxième point : « Faire une chaîne est une activité de modélisation difficile : on représente non les objets mais leur fonction du point de vue de l'énergie (on représente parfois des objets un peu particulier comme l'environnement) »*) donc c'était ça qui était dans cette idée / euh donc ça c'est ce qu'on vient de dire **on ne représente pas des objets on représente leurs fonctions d'un point de vue énergétique** // et si vous regardez pareil il y a des manuels qui font des chaînes énergétiques où ils superposent les dessins des objets / je ne sais pas / est-ce que / est-ce que c'est intéressant ou pas je ne sais pas // » (F1C, F1-8, 7-14)

Deux *fonctions énergétiques* peuvent être associées aux objets : ils sont alors considérés soit comme des convertisseurs d'énergie, soit comme des réservoirs d'énergie.

Comme l'illustrent les citations suivantes, les réservoirs et les convertisseurs sont directement désignés par le nom de l'objet auquel ils font référence :

« Les ressources fossiles sont des réservoirs d'énergie chimique » (F1-4, diapo 46)

« le piston c'est un convertisseur » (F1B, F1- 4, 148)

« votre réservoir qui est la batterie il a besoin d'être rechargé » (F1C, F1- 7, 478)

Ceci induit une identification forte entre l'objet et sa fonction énergétique, et donne l'impression que les réservoirs et les convertisseurs font partie du monde matériel – et non d'un monde théorique.

Les convertisseurs d'énergie

Dans ce modèle, un convertisseur est un dispositif ou un système qui modifie un type de transfert sans « stocker » d'énergie^{158, 159} ; il reçoit un transfert entrant et donne un transfert sortant :

« certains dispositifs ont la capacité / sans stocker // de recevoir un transfert // sous une certaine // forme je vais dire volontairement forme même si on verra après qu'on pourra discuter de ce mot / mais un **type de transfert // et donner un autre type de transfert** » (F1B, F1-3, 258-260)

« si on modifie le type de transfert il y a un transfert amont et un transfert aval / ou éventuellement plusieurs // transferts // en aval // eh bien ça c'est convertir / convertisseurs convertir » (F1B, F1-3, 295-297)

« Un convertisseur permet le changement de transfert : le transfert reçu par le convertisseur est alors différent du transfert donné. » (F1-6, fiche « modèle de l'énergie » ; voir aussi F1C, F1-6, 72-73 ; F1C, F1-6, 116-117 ; F1C, F1-6, 117-118 ; F1A, F1-7, 71-72 ; F1B, F1-3, 265-269)

Pour F1A, les convertisseurs sont spécifiquement associés à des appareils électriques ou technologiques (F1A, F1-11, 25 ; F1A, F1-11, 40-42).

La fiche « modèle de l'énergie » explique le fonctionnement d'un convertisseur « idéal ». Il s'agit d'un convertisseur qui convertit toute l'énergie¹⁶⁰ qu'il reçoit en énergie « utile » (F1-6, fiche « modèle de l'énergie »).

Les réservoirs d'énergie

Les réservoirs d'énergie sont mentionnés à plusieurs reprises par les formateurs (en particulier, par F1B) dès le troisième épisode, sans être définis ou explicités (F1B, F1-3, 284-285 ; F1B, F1-3, 299-302 ; F1B, F1-3, 305-306 ; F1B, F1-3, 310-311 ; F1A, F1-3, 583).

Le mot « réservoir » est également utilisé dans plusieurs questions du quiz (épisode 4), ce qui donne lieu à l'échange suivant :

« S : est-ce que le mot réservoir on pourra le modifier par source ou pas ? »

« F1B : on va en discuter de ça // une source c'est un objet et réservoir c'est un mot du modèle » (F1-4, 158-159)

Cependant, lors de la présentation du modèle (épisode 6), aucune définition claire ne sera apportée pour le concept de réservoir. Il sera implicitement défini par opposition au convertisseur :

« **L'énergie est stockée dans des réservoirs.** » (F1-6, fiche « modèle de l'énergie »)

158 c'est-à-dire : sans que la quantité d'énergie qu'il contient ne varie

159 Nous pouvons mettre cette définition en regard des propos tenus par F1B lorsqu'il évoquait la conservation de l'énergie : « si on cherche bien le seul système isolé de tout // c'est l'univers // par définition de l'univers // c'est notre degré de connaissance / qui dit ça // donc en fait que vous avez le seul système dont l'énergie se conserve / c'est l'univers alors ça c'est quand même pas très passionnant parce que / je crois que c'est pas ça qu'on va faire étudier à nos élèves » (F1B, F1-3, 181-191). Ce paradoxe apparent n'a pas été relevé pendant la formation.

160 ou « tout le transfert », pour reprendre les mots des formateurs

« on distingue bien le **rôle de réservoir** et du convertisseur **celui qui stocke** et celui qui va / changer le mode de transfert » (F1C, F1-6, 72-73)

Chaînes énergétiques

Règles de construction

Les règles de construction des chaînes énergétiques données aux enseignants-stagiaires figurent dans un document qui leur a été distribué pendant le sixième épisode, dont nous reproduisons l'extrait correspondant à la Figure 130. Ce document a été conçu à destination d'élèves de fin de Cycle 4.

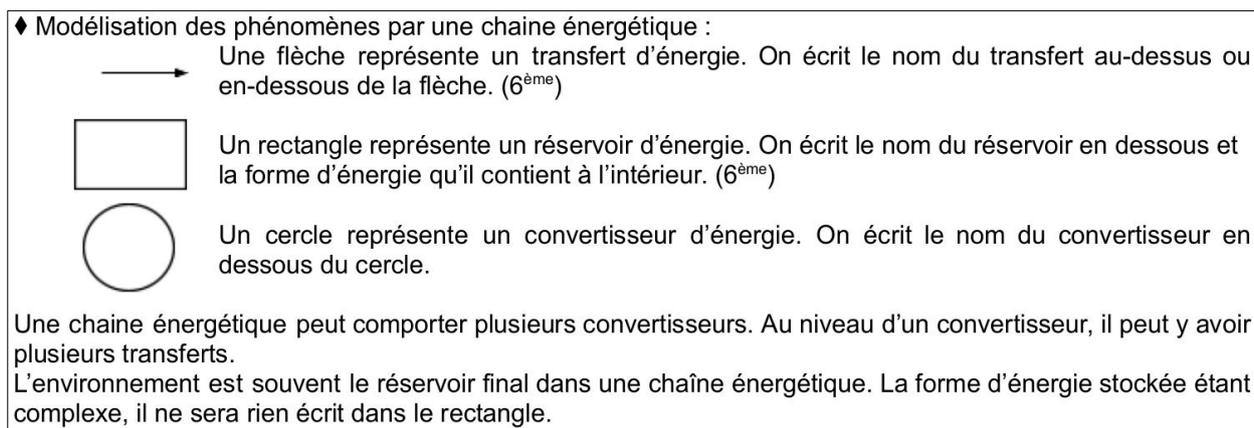


Figure 130: règles de représentation pour les chaînes énergétiques (F1-6, fiche "modèle de l'énergie")

La chaîne énergétique est présentée comme un assemblage de rectangles, de flèches et de cercles qui représentent respectivement des réservoirs, des transferts et des convertisseurs d'énergie.

Selon les formateurs, dans l'enseignement secondaire, il existe un consensus concernant la représentation des réservoirs et des convertisseurs par des rectangles et des cercles ; par contre, la représentation des transferts par des flèches fines en trait plein ne fait pas consensus (F1A, F1-8, 60-63).

Chaînes énergétiques et caractéristiques de l'énergie

Nous avons vu que la chaîne énergétique prend appui sur certaines caractéristiques de l'énergie : les transferts d'énergie, les conversions d'énergie et le stockage de l'énergie (par définition des réservoirs d'énergie).

Pour F1A et F1C, en plus de représenter ces caractéristiques de l'énergie, le fait que ces chaînes commencent et se terminent pas un réservoir en font des illustrations de la propriété de conservation de l'énergie. Sans ces réservoirs initial et final, elles considèrent qu'il y a « un problème de conservation » de l'énergie (F1-6, 230-243).

Ces chaînes énergétiques étant clairement présentées comme des chaînes *pendant* (voir ci-après), nous nous demandons dans quelle mesure elles peuvent représenter la conservation de l'énergie, c'est-à-dire l'absence de variation de la quantité totale d'énergie entre deux instants. Nous posons

l'hypothèse d'une vision substantialiste de l'énergie, appuyée par l'utilisation des termes « réservoirs » et « stocks » : dans cette optique, l'énergie, assimilée à une substance, est contenue dans un réservoir, puis passe par des convertisseurs qui ne peuvent pas la *stocker*, et doit donc nécessairement *terminer son itinéraire* dans un réservoir final. La chaîne ainsi décrite comporte une dimension temporelle et mobilise un raisonnement de type causal linéaire, considéré par F1B comme néfaste pour les apprentissages liés à l'énergie (voir ci-après, *Limites du modèle*).

Les chaînes énergétiques peuvent également permettre de représenter des valeurs de puissance, indiquées sur les flèches ou liées à l'épaisseur de ces flèches (F1A, F1-6, 298-307) ; par ailleurs, selon les formateurs, une flèche épaisse représente *nécessairement* une valeur de puissance (F1A, F1-8, 88-97 ; F1A, F1-8, 119-122).

La « boîte noire »

La plupart du temps, il n'existe pas une unique chaîne énergétique associée à chaque situation ; selon les objectifs visés et/ou selon le niveau d'enseignement, la chaîne attendue (la mieux adaptée) sera différente :

« F1C (*discrètement*) : euh / la boîte noire on en parle ?

F1A : la boîte noire

F1C (*plus fort*) : c'est-à-dire ce ce schéma selon quel niveau vous êtes vous pouvez le faire différemment

S : détailler le smartphone

F1C : voilà on peut détailler ce qu'il y a dans le smartphone et du coup détailler qu'il y a un truc qui va faire le rayonnement / un truc qui va faire le thermique / un truc qui va faire le mécanique / ça dépend où on décide de placer la boîte noire / et par rapport à ça il ne faut pas / enfin | - il faut rassurer aussi les élèves » (F1-7, 87-109)

« la question qu'on se pose souvent sur ces centrales c'est de savoir si on distingue le // le rotor et // et l'alternateur en tant que tel quoi // bon là c'est concaténé / moi je trouve que quand on distingue la partie mécanique de la partie électromécanique // pff sur la partie qui tourne on ne sait pas trop quoi dire // parce que on se rend / c'est plus / c'est plus un convertisseur en fait // on a des convertisseurs qui sont finalement des / des convertisseurs de transfert mécanique linéaire en transfert mécanique de rotation (...) est-ce que ça -| vaut le coup de mettre un convertisseur uniquement parce qu'on est passé d'un déplacement linéaire à un déplacement circulaire ? // je crois que ça ne vaut pas le coup quoi » (F1B, F1-7, 286-294)

Pour que les élèves tracent la chaîne attendue, les formateurs conseillent de leur donner des documents permettant d'identifier le convertisseur et/ou le réservoir à représenter (F1-8, 14-20 ; 198-208).

Réservoir « initial » et réservoir « final »

Pour F1A et F1C, nous avons vu que les chaînes énergétiques doivent se terminer par un réservoir. Sur la fiche « Modèle de l'énergie », il est écrit :

« L'environnement est souvent le réservoir final dans une chaîne énergétique. La forme d'énergie stockée étant complexe, il ne sera rien écrit dans le rectangle. » (Figure 130)

Lors de la correction d'une chaîne énergétique, les formateurs posent également la question de la nécessité de faire commencer une chaîne par un réservoir. Selon F1A, les chaînes énergétiques doivent systématiquement commencer par un rectangle ; pour F1B et F1C, il n'est pas toujours nécessaire de faire figurer un réservoir initial, notamment lorsqu'il est question de représenter un appareil électrique branché sur le secteur – le réservoir initial, lié au fonctionnement des centrales électrique, étant difficile à identifier (F1-8, 204-217).

Progressivité du modèle

Le modèle est présenté comme progressif, pour un enseignement depuis la classe de 6^e jusqu'à la fin du Cycle 4.

Dans un premier temps, il ne prend pas en considération les phénomènes électriques (F1-6, 218). De ce fait, les transferts électriques n'en font pas partie. Les formes d'énergie chimique et nucléaire ne sont pas non plus évoquées (F1-6, 75), tout comme les convertisseurs, qui seront pris en compte à partir de la 5^e (F1-6, 219). L'extrait ci-après montre les évolutions possibles de ce modèle, intimement liées à sa représentation par les chaînes énergétiques :

« F1C : alors ça c'était avec l'idée des puissances //

F1A : oui c'est-à-dire que ces chaînes à un moment on peut les / quoi les changer selon les niveaux / mais je dirais que ça devient quand même anecdotique moi dans mon enseignement /

F1C : oui finalement oui //

F1A : c'est-à-dire qu'on fait pas tellement évoluer le modèle /

F1C : on rajoute des éléments on rajoute des transferts on rajoute des choses mais voilà / moi je ne n'exige pas les réservoirs début et fin au début / donc voilà / c'est des systèmes qui vont évoluer (...)

F1B : faut dire quand même que ça évolue au lycée aussi (...) ce n'est pas une histoire sans suites quoi // pour une fois que vous avez un truc qui va vraiment vraiment / être réinvesti au lycée / ne le négligez pas quoi (...) c'est quand même bien de dire que c'est un outil évolutif et / on n'en a pas beaucoup des outils qui évoluent de la sixième à la terminale // voilà on l'enrichit on va lui faire dire plus de trucs on va pouvoir mettre la puissance le rendement » (F1-8, 21-48)

Limites du modèle

Nous avons mis en évidence que les formes d'énergie et les transferts d'énergie tels que définis dans ce modèle (voir ci-avant) ne permettent pas de décrire les changements d'état – qui ne peuvent donc *a priori* pas être représentés par des chaînes énergétiques.

Nous posons l'hypothèse que l'assimilation des transferts à des observables entraîne également une limite au modèle. Par exemple, le fait d'associer un transfert mécanique à tout objet en mouvement ne permet pas de décrire les différences entre une voiture accélérant, décélérant ou conservant sa vitesse et implique, *a priori*, qu'une même chaîne énergétique représente ces trois situations.

Par ailleurs, l'attribution d'une unique fonction énergétique (réservoir ou convertisseur) à chaque objet considéré implique que certaines situations ne peuvent pas être représentées par des chaînes énergétiques – comme celles dans lesquelles la quantité d'énergie contenue dans un convertisseur

varie au cours du temps. Les mises en mouvements de véhicules posent problème : puisque le réservoir initial d'énergie est inclus dans le véhicule, son énergie cinétique augmente ; il fait partie du réservoir final. Cela soulève la question des rétroactions, difficiles à interpréter et *a priori* impossibles à représenter par des chaînes énergétiques.

Pendant la formation, une autre limite du modèle est évoquée. Il s'agit de l'interprétation de situations où l'énergie stockée n'a pas la même forme que l'énergie transférée :

« F1A : (...) la chaîne elle est vraiment / on va chipoter sur le muscle là parce qu'on est entre profs // mais bon le muscle

S : je le fais en cours aussi / et ça ça / ouais mes sixièmes ça les pique

F1C : parce qu'ils ont un cours de bio où ils ont fait l'énergie musculaire

S : bah peut-être non c'est juste que / en fait tu as un réservoir avec une forme d'énergie // et que tu as un transfert sous une // une autre forme //

F1A : c'est là où ça devient piquant / c'est c'est c'est le seul truc qui est piquant // maintenant / ils ne sont pas piqués comme vous sur les mêmes choses que

S : oui mais ça

F1A : ah ça soulève des questions hein / comment ça se fait que il y ait du thermique ou il y ait du mécanique // » (F1-11, 123-133)

Selon nous, il ne s'agit pas d'une limite du modèle, mais d'une erreur d'interprétation : le modèle reposant sur la distinction entre formes d'énergie et transferts d'énergie, il est normal que la forme d'énergie qui varie au sein d'un réservoir ne soit pas identifiable au transfert d'énergie qu'il effectue.

Nous remarquons que les transformations d'énergie ne sont que rarement évoquées pendant la formation : elles le sont uniquement par opposition aux conversions d'énergie. Nous nous posons la question de leur prise en considération dans le modèle scientifique scolaire proposé.

Par ailleurs, la dégradation de l'énergie et les phénomènes dissipatifs ne sont pas modélisés dans ce modèle.

Limites spécifiques des chaînes énergétiques

Le choix du réservoir initial d'une chaîne impliquant un appareil électrique branché sur le secteur, évoqué précédemment, est une limite des chaînes énergétiques qui ont été proposées pendant la formation F1. De la même manière, le réservoir final d'une chaîne énergétique focalisée sur le fonctionnement d'une centrale électrique est impossible à identifier en tant que tel.

Par ailleurs, ces chaînes ne prennent pas en considération les différentes formes d'énergie associées à chaque système : de ce fait, elles ne peuvent pas représenter de transformations de l'énergie. F1C évoque cette limite brièvement à deux reprises (F1C, F1-8, 6-7 ; F1C, F1-7, 274-277).

F1B souligne que les chaînes énergétiques sont cohérentes avec un raisonnement linéaire causal, et peuvent renforcer ce type de raisonnement (F1B, F1-8, 211-225). Il présente cet aspect des chaînes énergétiques comme « dévastateur » et met en garde les enseignants contre cela. Selon lui,

ce type de raisonnement ne peut pas être considéré comme un appui pour les apprentissages liés à l'énergie¹⁶¹.

La substantialisation de l'énergie, inhérente à l'utilisation des chaînes énergétiques, n'est pas évoquée par les formateurs.

17.3. Analyse de la séance de formation

Pendant la journée de formation, les enseignants-stagiaires ont été mis en activité par les formateurs à 7 reprises ; nous associons ces mises en activité à des tâches. Pendant chacune de ces tâches, nous nous focalisons sur l'activité des formateurs.

Les deux premières tâches visent à « mettre en confiance » les stagiaires (RP-F1, 31-34) et à les « faire entrer (...) dans la formation » (RP-F1, 260-261). Elles ne sont pas directement liées à l'énergie et à nos questions de recherche, c'est pourquoi nous n'en proposons pas d'analyse.

Pour chacune des autres tâches, nous présentons une analyse a priori, en appui sur la rencontre de préparation à la formation et le déroulé produit par les formateurs pendant cette rencontre (annexe D). Nous analysons ensuite le déroulement réel de la tâche.

Les tâches 1 à 4 précèdent les apports théoriques, c'est-à-dire la présentation de connaissances relatives au concept scientifique et au concept scientifique scolaire d'énergie. La tâche 5 précède la présentation formelle par les formateurs du modèle scientifique scolaire de l'énergie qu'ils proposent ; les tâches 6 et 7 lui succèdent.

Tâche 3 : étiquettes – analyse a priori

Descriptif

D'après le déroulé (annexe D, synopsis prévu, p.2), cette tâche consiste à compléter des fiches (« étiquettes ») qui comportent un texte à trous : « stocke ..., conserve..., transfère..., convertit... en ..., reçoit..., fournit... ». À chaque étiquette est associé un objet. Selon le synopsis prévu (p.2), les objets dont il est question sont une lampe torche à secouer, une pile et un chargeur de téléphone ; selon les échanges entre formateurs, il s'agit d'une lampe à manivelle, d'une pile, d'un téléphone portable et d'un chargeur (RP-F1, 87-88).

Les enseignants-stagiaires doivent ensuite proposer une définition pour les verbes *stocker*, *transférer*, *convertir* et *conserver*.

Objectif

L'objectif annoncé est de mettre en évidence les difficultés des enseignants-stagiaires relatives au modèle scolaire¹⁶² de l'énergie qu'ils mobilisent (annexe D, synopsis prévu, p.2 : « Les collègues vont avoir du mal et/ou ne vont pas tous avoir les mêmes réponses, ni pour les verbes ni sur la façon de qualifier les transferts et les formes »).

161 Nous avons évoqué cet aspect des chaînes énergétiques au §4.4 : certains didacticiens considèrent qu'il peut être un levier pour les apprentissages, cependant aucune étude n'a, à notre connaissance, démontré cela (ou l'inverse).

162 Selon nous, il s'agit d'un modèle *scolaire*, cependant les formateurs ne le présentent pas en tant que tel.

Remarques liées à l'organisation de la tâche

Cette tâche est discutée à trois reprises pendant la rencontre préparatoire (Tableau 13, épisodes 3, 7 et 11), mais elle n'est pas décrite. Les deux premiers épisodes comportent uniquement des détails organisationnels et matériels. Pendant le troisième épisode (épisode 11), les formateurs discutent de la correction de cette tâche et choisissent qu'elle sera en partie faite juste après sa réalisation par les enseignants-stagiaires (correction des étiquettes), puis pendant les « apports théoriques » (définition des verbes) (RP-F1, 513-524). Une absence de correction est aussi évoquée (RP-F1, 548-549), mais n'est pas retenue. Cependant, le synopsis prévoit une correction des définitions des verbes à la suite de la tâche, et ne prévoit pas de correction des cartes, pourtant jugée nécessaire pendant la discussion (RP-F1, 550-554).

Durée prévue pour l'activité : 20 minutes de résolution et 20 minutes de discussions (annexe D, synopsis prévu, p.2).

Tâche 3 : étiquettes – analyse effective

Déroulement

Une diapositive de consigne générale est projetée :

« Vous avez 4 objets présentés sur des étiquettes. Cocher les actions possibles de l'objet par rapport à l'énergie »

en-dessous de laquelle se trouvent quatre photos légendées :

- un chargeur (photo d'un chargeur non branché, câble enroulé) ;
- une lampe à manivelle (photo d'une lampe à manivelle actionnée par une main) ;
- une pile (photo d'une pile plate 4,5 V neuve – languettes rabattues) ;
- un téléphone portable (photo d'un smartphone, écran allumé).

En bas de page, une seconde consigne est donnée :

« Puis définir de manière simple les verbes : stocker – transférer – convertir – conserver. »

F1A précise que cette activité a déjà été « mis[e] en test avec des élèves plutôt de lycée » (F1-2, 7). Elle ajoute qu'il s'agit d'étudier un objet technique sous l'angle de l'énergie (F1-2, 13-16) en groupes (F1-2, 17). Les cartes plastifiées correspondant à chaque objet et des feutres sont distribués aux enseignants-stagiaires.

Pendant que les enseignants-stagiaires travaillent en groupes de deux ou trois, les formateurs discutent entre eux puis passent regarder les propositions des différents groupes. L'ensemble dure environ 14 minutes.

Pour mettre en commun les réponses, une diapositive (Figure 131) est projetée et complétée au tableau par F1C, sous la dictée des enseignants-stagiaires. Les propositions associées aux différents objets sont faites par les membres de groupes différents, désignés par F1A (F1-2, 34-35 ; 107-108 ; 159 ; 165-166). Pour chaque objet, les enseignants-stagiaires sont invités à réagir et à exprimer leur avis (F1-2, 46-47 ; 84-85). À aucun moment les formateurs ne donnent leur avis sur les différentes

propositions ; ce qui est écrit au tableau correspond exactement à ce que les enseignants-stagiaires leur ont dicté. Les formateurs expliquent aux enseignants-stagiaires qu'une correction finale leur sera donnée par la suite :

« après il y aura une version correction finale / là on laisse des choses en suspens hein / je pense que c'est le but / mais il y aura // vous aurez » (F1A, F1-2, 85-86)

« activité étiquettes »

 <p>Un chargeur</p> <ul style="list-style-type: none"> <input type="checkbox"/> reçoit de ... <input type="checkbox"/> fournit de ... <input type="checkbox"/> transfère de <input type="checkbox"/> stocke de ... <input type="checkbox"/> convertit de en <input type="checkbox"/> conserve de 	 <p>Cette lampe-manivelle</p> <ul style="list-style-type: none"> <input type="checkbox"/> reçoit de ... <input type="checkbox"/> fournit de ... <input type="checkbox"/> transfère de <input type="checkbox"/> stocke de ... <input type="checkbox"/> convertit de en <input type="checkbox"/> conserve de 	 <p>La pile</p> <ul style="list-style-type: none"> <input type="checkbox"/> reçoit de ... <input type="checkbox"/> fournit de ... <input type="checkbox"/> transfère de <input type="checkbox"/> stocke de ... <input type="checkbox"/> convertit de en <input type="checkbox"/> conserve de 	 <p>Le téléphone</p> <ul style="list-style-type: none"> <input type="checkbox"/> reçoit de ... <input type="checkbox"/> fournit de ... <input type="checkbox"/> transfère de <input type="checkbox"/> stocke de ... <input type="checkbox"/> convertit de en <input type="checkbox"/> conserve de
---	---	--	--

Figure 131: diapo 10 projetée pour la correction de la tâche

Plus tard dans la formation, après avoir discuté du concept scientifique d'énergie, du théorème de l'énergie cinétique et du théorème de l'énergie mécanique, F1B revient sur les définitions des verbes *stocker*, *transférer*, *convertir* et *conserver* (F1-3, 293-317) : convertir est défini comme « modifier le type de transfert d'énergie », transférer est défini comme « déplacer l'énergie d'un système à un autre », stocker est défini comme « garder une énergie sans modifier sa forme ». Une diapo présente ces définitions et est barré de la phrase « Tout ceci se fait avec CONSERVATION » (le verbe « conserver » n'est pas défini).

Analyse

Commençons par poser la question de place de la modélisation dans la tâche proposée aux enseignants-stagiaires.

La consigne écrite dans la première diapositive (« Vous avez 4 objets présentés sur des étiquettes. Cocher les actions possibles de l'objet par rapport à l'énergie. ») est difficile à analyser dans le cadre de la modélisation, puisqu'elle demande d'identifier des objets (monde des objets et des événements) à leurs actions (monde des objets et des événements) par rapport à l'énergie (monde des théories et des modèles). De la même manière, les étiquettes à compléter (Figure 131) comportent des photos (monde des objets) d'objets à associer directement à des verbes supposés être en lien avec l'énergie (monde des théories et des modèles). Ici, il n'est pas attendu que les

enseignants-stagiaires fassent appel à un processus de modélisation, mais qu'ils identifient directement des objets à une fonction énergétique. Cette analyse est confirmée par les propos tenus par les formateurs pour initier l'activité : il s'agit de « dire ce que fait l'objet est-ce qu'il stocke est-ce qu'il transfère est-ce qu'il convertit // l'énergie » (F1A, F1-2, 15-16).

Dès le début de la mise en commun, un stagiaire soulève la question du rapport entre la réalité et le modèle, et demande des précisions qui lui semblent nécessaires pour répondre aux questions demandées :

« en fait de quoi on parle ? // on a // ça dépend comment on pose le truc mais // il y a la // la différence / réalité modèle en fait si le / le système il est idéal la déperdition thermique elle n'y est pas si il l'est pas / elle y est et du coup ça dépend aussi à quel niveau on / on est dans / dans notre / est-ce qu'on est avec des cinquième ou des troisième / » (F1-1, 48-51)

Pour F1A, la question reste ouverte : chacun est libre du choix du système (idéal ou non) pour répondre à la question posée (F1-1, 52-58). Dans cet échange, la « réalité » apparaît comme un « modèle "sans pertes" », possiblement identifié à l'objet lui-même.

Par ailleurs, le fait de parler du fonctionnement énergétique d'un objet, et non d'un objet *dans une situation*, pose question. En particulier, les photos associées aux différents objets sont, pour trois d'entre elles, les représentations d'un objet qui n'est pas « en cours d'utilisation », qu'il faut imaginer être dans une situation autre pour pouvoir répondre aux questions posées. Ce point est abordé par F1A pendant la mise en commun, afin de s'assurer que tous les enseignants-stagiaires ont bien considéré que le chargeur était branché et alimentait un appareil électrique. Elle signale que les élèves peuvent se questionner à ce sujet, mais ne considère pas nécessaire de lever l'implicite dans l'énoncé (F1A, F1-1, 98-104).

Parmi les phrases à cocher et compléter, on remarque la proposition « [l'objet] conserve de ... », et la demande de la part des formateurs de définir le verbe « conserver », en lien avec cette proposition. Des discussions ont lieu entre enseignants-stagiaires et formateurs en lien avec la polysémie du verbe « conserver », qui signifie à la fois *garder en bon état, sauvegarder* (ce qui équivaut à stocker) et *ne pas modifier* (sens plus proche de celui associé à la conservation de l'énergie), comme l'illustre les propos tenus par un enseignant-stagiaire :

« c'est par rapport à la conservation // je me mets à la place d'un élève c'est conservé // tout dépend comment / voilà // sur quel // comment on définit les mots // parce que là conserve oui il y a une conservation de l'énergie // mais ça conserve rien je décharge / il n'y a pas d'énergie qui est stockée dans l'appareil » (F1-1, 94-97)

Cette polysémie est connue comme étant un obstacle pour l'apprentissage du concept d'énergie (§3.2), mais n'est pas relevée en tant que telle par les formateurs.

La correction de l'activité était initialement prévue en deux temps : la correction formelle des étiquettes, prévue à la suite de la présentation des réponses des enseignants-stagiaires et jugée nécessaire pendant la rencontre préparatoire (RP-F1, 550-554) – mais absente du déroulé – n'a finalement pas eu lieu. La définition des verbes n'a pas été demandée aux enseignants-stagiaires pendant la mise en commun. Des définitions ont été données pendant la partie dite « théorique »,

comme prévu initialement (sans prise en compte des réponses initiales des enseignants-stagiaires) ; elles sont présentées comme justifiées par la théorie énergétique.

Durée de la période d'activité : 28' + 2' de correction des verbes (pour rappel et comparaison, durée prévisionnelle : 40')

Tâche 4 : QCM – analyse a priori

Descriptif

Cette tâche n'a pas été décrite pendant la rencontre préparatoire et ne l'est que très succinctement dans le synopsis prévu (p.3 : « question sur le soleil ; question sur la pile hydrogène ; question sur la voiture électrique ?? ; question ressource fossile »).

Objectif

Le seul élément nous permettant d'inférer l'objectif visé par cette tâche est la phrase « c'est une façon de tester les apports théoriques qu'on a donnés », prononcée par F1C et approuvée par F1B pendant la rencontre préparatoire (RP-F1, 629-630).

Remarques liées à l'organisation de la tâche

Tout comme la tâche « étiquettes », cette tâche est discutée uniquement sous un angle organisationnel, en particulier relativement aux boîtiers de vote qui seront utilisés pendant la séance (RP-F1, 422-427, 631-632) et aux photocopies du QCM (RP-F1, 633-642).

Durée prévue pour l'activité : 30 minutes (annexe D, synopsis prévu, p.3).

Tâche 4 : QCM – analyse effective

Objectif annoncé

Le QCM est présenté sur des diapos intitulées « Convenir d'un vocabulaire – un quizz pour se mettre d'accord ». Après avoir effectué et corrigé cette tâche, on peut supposer qu'un vocabulaire commun, partagé par les formateurs et les enseignants-stagiaires, aura été établi.

Déroulement

Les QCM ont été distribués sur les tables des enseignants-stagiaires pendant la pause (Figure 132). La mise en commun des réponses sera faite à l'aide de boîtiers de vote, qui sont distribués aux stagiaires et donnent lieu à des discussions (différents types de boîtiers, prix, subventions...)

Les enseignants-stagiaires disposent de près de huit minutes pour prendre connaissance des questions et y répondre. Pour chaque question, une ou plusieurs bonnes réponses sont attendues.

QCM

Une ou plusieurs réponse(s) juste(s)

Question 1

Du point de vue de l'énergie, le soleil

1. est une ressource renouvelable
2. ne transfère de l'énergie que par rayonnement
3. permet également de disposer d'énergie hydraulique grâce aux barrages
4. n'a rien à voir avec les ressources fossiles que nous utilisons abondamment

Question 2

Une pile à combustible fonctionne avec un réservoir de dihydrogène. Le dihydrogène

1. est un réservoir d'énergie chimique
2. est une ressource d'énergie renouvelable
3. est une ressource d'énergie naturelle
4. est disponible en tellement grande quantité qu'il permettra de résoudre le problème de l'épuisement des ressources

Question 3

Les ressources fossiles

1. sont des réservoirs d'énergie chimique
2. ne transfèrent de l'énergie que par rayonnement lors de leur combustion
3. existent grâce à l'énergie transférée par le Soleil il y a longtemps
4. sont renouvelables

Question 4

L'électricité

1. est une forme d'énergie
2. est un mode de transfert de l'énergie
3. peut être produite à partir de différentes sources d'énergie, renouvelables ou non
4. est un phénomène pouvant être caractérisé par la grandeur puissance

Question 5

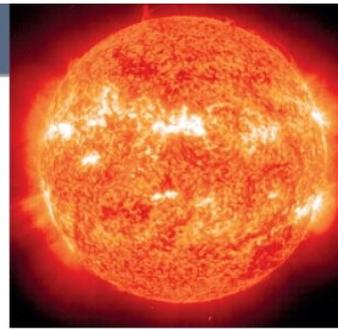
La lumière

1. est un mode de transfert d'énergie parmi d'autres
2. est une forme d'énergie
3. est forcément produite grâce à l'électricité
4. s'accompagne généralement de transfert thermique

Figure 132: énoncé du QCM distribué aux enseignants-stagiaires (F1-4)

Lors de la mise en commun, les enseignants-stagiaires sont invités à indiquer leurs choix en utilisant les boîtiers de vote. Pour chaque question, une diapositive est projetée, sur laquelle figurent la question, les propositions (choix multiples), le nombre d'enseignants-stagiaires ayant choisi chaque proposition et la justesse de la proposition (vert : réponse correcte, rouge : réponse incorrecte ; jaune : réponse sujette à discussions). Ces diapositives sont présentées ci-après (Figure 133, Figure 134, Figure 135, Figure 136, Figure 137).

2- Convenir d'un vocabulaire
a- Un quizz pour se mettre d'accord



Question 1

Du point de vue de l'énergie,
le soleil

1. est une ressource renouvelable
2. ne transfère de l'énergie que par rayonnement
3. permet également de disposer d'énergie hydraulique grâce aux barrages
4. n'a rien à voir avec les ressources fossiles que nous utilisons abondamment

7

3

3

1

Figure 133: QCM - question 1 corrigée

Après la projection de la correction de la première question, les formateurs demandent aux enseignants-stagiaires s'ils ont des questions ou des réactions (F1-4, 24-25).

La deuxième proposition, présentée comme vraie et fausse (ou ni vraie ni fausse), est discutée, essentiellement à l'initiative de F1B (F1-4, 26-36). Il pose la question de la relation entre rayonnement et transfert thermique dans les termes suivants :

« est-ce que // un transfert thermique c'est du rayonnement // ou à l'inverse est-ce que / un rayonnement // c'est toujours accompagné d'un transfert thermique » (F1-1, 35-37)

puis il répond que le choix fait par les formateurs est de distinguer rayonnement et transfert thermique (F1-4, 56-58).

Un enseignant-stagiaire, qui n'a pas considéré la première proposition comme correcte, fait remarquer que le terme « renouvelable », dans son sens littéral (susceptible de se renouveler), n'est pas adapté au Soleil (F1-4, 59-77).

2- convenir d'un vocabulaire
a- Un quizz pour se mettre d'accord

Question 2

Une pile à combustible fonctionne avec un réservoir de dihydrogène.

Le dihydrogène

1. est un réservoir d'énergie chimique
2. est une ressource d'énergie renouvelable
3. est une ressource d'énergie naturelle
4. est disponible en tellement grande quantité qu'il permettra de résoudre le problème de l'épuisement des ressources



9

4

1

0

Figure 134: QCM - question 2 corrigée

Après avoir projeté les réponses associées à la question 2, F1B constate que certains enseignants-stagiaires n'ont pas considéré le dihydrogène comme un réservoir d'énergie chimique (F1-4, 89), puis expose que l'« hydrogène » n'est pas une ressource, mais est produit à 95 % à partir de ressources fossiles de façon particulièrement polluante (F1-4, 89-96). Il ajoute :

« le dispositif qui est là (*il désigne la photo de la diapo*) (...) est pertinent parce que c'est de l'hydrogène renouvelable » (F1B, F1-4, 97-98)

puis nuance son propos :

« enfin je sais pas d'ailleurs celui-là on sait pas trop comment il a été fabriqué (...) mais souvent les trucs portables comme ça (...) toute la journée vous avez un électrolyseur et vous fabriquez de l'hydrogène // avec du Soleil » (F1B, F1-4, 103-107)

Il distingue ensuite les « ressources d'énergie », directement présentes dans la nature, et les « vecteurs d'énergie », élaborés à partir de ressources d'énergie (F1B, F1-4, 111-1112).

2- Convenir d'un vocabulaire
a- Un quizz pour se mettre d'accord



Question 3

Les ressources fossiles

1. sont des réservoirs d'énergie chimique
2. ne transfèrent de l'énergie que par rayonnement lors de leur combustion
3. existent grâce à l'énergie transférée par le Soleil il y a longtemps
4. sont renouvelables

14

3

7

0

Figure 135: QCM - question 3 corrigée

Après avoir projeté les réponses associées à la question 3, F1B constate que personne n'a considéré que les ressources fossiles sont renouvelables, puis discute une nouvelle fois du transfert par rayonnement, qu'il ne considère pas comme unique transfert ayant lieu lors de la combustion de ressources fossiles, bien qu'il semble accepter d'autres points de vue :

« OK // bon // ça va personne n'a mis 4 quand même // énergie chimique // unanimité // alors ne transfèrent de l'énergie que par / rayonnement // lors de leur combustion // moi je considère que ce n'est pas valide » (F1B, F1-4, 126-128)

Un enseignant-stagiaire pose la question de l'explosion d'une ressource fossile, qui, selon lui, libère de l'énergie mécanique. F1B lui répond que l'explosion est due au transfert thermique et que le transfert mécanique est dû à la présence d'un piston (F1-4, 146-148).

2- Convenir d'un vocabulaire
a- Un quizz pour se mettre d'accord



Question 4

L'électricité

- | | |
|---|----|
| 1. est une forme d'énergie | 6 |
| 2. est un mode de transfert de l'énergie | 12 |
| 3. peut être produite à partir de différentes sources d'énergie, renouvelables ou non | 12 |
| 4. est un phénomène pouvant être caractérisé par la grandeur puissance | 6 |

Figure 136: QCM - question 4 corrigée

La question 4 ouvre le débat sur la nature des phénomènes électriques par la question d'un enseignant-stagiaire : « pourquoi [l'électricité] ce ne serait pas une forme d'énergie ? » (F1-4, 167). Après avoir dit qu'il a longuement travaillé sur ce sujet, F1B expose la distinction que les formateurs font entre forme d'énergie :

« ce qu'on appelle forme d'énergie c'est ce qu'on peut stocker » (F1B, F1-4, 181)

et transfert d'énergie :

« je veux bien distinguer / les adjectifs que j'utilise pour les stocks / et les adjectifs que j'utilise pour les transferts / j'essaie de m'interdire de parler d'énergie électrique » (F1B, F1-4, 186-188)

Il est précisé que cette distinction relève d'un choix :

- « le point de vue que je défends » (F1B, F1-4, 178)
- « ce point de vue » (F1B, F1-4, 181)
- « mon point de vue » (F1B, F1-4, 186)
- « on peut avoir différentes définitions » (F1B, F1-4, 246-247)

d'où la couleur jaune associée à la proposition « l'électricité est une forme d'énergie ».

Suite à la question d'un stagiaire, F1C et F1B confirment que, selon eux, il n'existe pas de forme d'énergie *lumineuse* (F1-4, 189-192).

Les formateurs précisent que le choix de séparer les formes d'énergie et les transferts d'énergie n'est pas partagé par l'institution, c'est-à-dire par les rédacteurs des programmes, des sujets de brevet et par l'inspection (F1-4 ; 173-175 ; 210-213 ; 234-242 ; 271).

Pour conclure la correction de cette question, F1B évoque les rares cas dans lesquels l'électricité peut être stockée (F1B, F1-4, 258-269).

2- Convenir d'un vocabulaire
a- Un quizz pour se mettre d'accord



Question 5

La lumière

1. est un mode de transfert d'énergie parmi d'autres	12
2. est une forme d'énergie	3
3. est forcément produite grâce à l'électricité	0
4. s'accompagne généralement de transfert thermique	8

Figure 137: QCM - question 5 corrigée

Après avoir projeté les réponses associées à la question 5, F1B revient sur le choix fait par les formateurs de séparer les formes d'énergie et les transferts d'énergie (F1-4, 276) et évoque les rares cas où la lumière peut être stockée (F1-4, 277-279).

Pour conclure l'activité, F1B souligne que les questions de ce QCM peuvent être utilisées en classe par les enseignants (F1-4, 288).

Analyse des questions

Dans un premier temps, nous analysons chacune des questions et des propositions dans le cadre de la modélisation. Nous mettons en évidence un « mélange » fréquent entre les deux mondes, au sein de l'ensemble des questions, où objets et concepts sont souvent confondus l'un dans l'autre¹⁶³.

La première question porte sur le Soleil (monde des objets et des événements) qui est assimilé à une « ressource » (monde des objets et des événements) « renouvelable » et à un objet « permet[tant] également de disposer d'énergie hydraulique grâce aux barrages » (Figure 133). Cette dernière proposition est difficile à interpréter (et à analyser), puisqu'elle met en relation

¹⁶³ Ce QCM est présenté comme un exercice permettant de définir et de discuter de mots et de concepts en lien avec l'énergie, mais une réponse « mélangeant les deux mondes » n'est pas considérée par les formateurs comme erronée.

directe des objets (Soleil, barrage) et un concept (énergie hydraulique), qui n'est pas défini. L'utilisation du verbe « disposer », anthropocentré (tout comme l'expression « grâce à »), pose également question. Cette question semble avoir pour objectif de rappeler le rôle du Soleil dans les phénomènes observables sur Terre, qui peuvent être expliqués par la théorie énergétique¹⁶⁴.

L'énoncé de la question 2 (Figure 134 : « Une pile à combustible fonctionne avec un réservoir de dihydrogène ») ne fait référence de façon certaine ni au monde des objets et des événements, ni au monde des théories et des modèles : la pile est-elle considérée comme un objet ou comme un concept ? doit-elle être assimilée à la photo qui est associée à cette question ? le dihydrogène est-il considéré en tant que substance ou en tant que concept ? que faut-il entendre par « réservoir de dihydrogène » : s'agit-il d'un réservoir matériel ou conceptuel ?

Dans cette analyse, nous supposons que le dihydrogène est assimilé à une substance, ce qui est cohérent avec les propositions 2, 3 et 4, où il est identifié à une ressource. Dans la première proposition, cet objet est identifié à un élément du modèle scientifique scolaire de l'énergie (qui n'a pas encore été présenté aux enseignants-stagiaires) : le réservoir¹⁶⁵ d'énergie chimique. Les deuxième et troisième propositions posent la question de son caractère renouvelable ou non et naturel ou non. Bien qu'il ne soit pas clairement défini (voir ci-après), le terme renouvelable fait référence à une ressource qui est exploitée plus rapidement qu'elle ne se régénère à l'échelle de la planète. La question de savoir si le dihydrogène, dans l'absolu, est naturel ou non est problématique, puisqu'il s'agit d'une substance très abondante dans l'univers, mais relativement rare sur la planète Terre.

Une analyse similaire peut être faite pour la question 3 (Figure 135), où les ressources fossiles sont soit identifiées au monde des théories et des modèles (propositions 1 et 2), soit considérées comme appartenant au monde des objets et des événements (proposition 3 et 4). La proposition 3 fait référence au Soleil et à son rôle dans la constitution des ressources énergétiques (voir ci-avant, question 1).

Les questions 4 et 5 concernent l'électricité et la lumière, qui seront par la suite présentées comme des phénomènes (§17.2) (monde des objets et des événements). Les propositions 1 et 2 les assimilent à des concepts, tandis que dans les propositions 3 et 4, elles sont présentées comme des phénomènes (monde des objets et des événements), voire comme des objets, pouvant être « produits » (propositions 3).

164 À ce sujet, nous rappelons ce petit texte de Feynman (1980) : « Mon père lui aussi aborda avec moi la question de l'énergie, mais il n'utilisa le terme qu'après m'avoir donné une petite idée de ce que c'est. Je sais ce qu'il aurait fait, lui, pour me faire comprendre cet exemple. Je le sais parce que le cas s'est produit à propos d'un exemple différent. Il m'aurait dit : "C'est parce que le soleil brille que le chien marche." A quoi j'aurais répondu : "Mais non, le soleil n'a rien à voir là-dedans ! Le chien marche parce que j'ai remonté le ressort. –Oui, mais mon petit ami, qu'est-ce qui te donne la force de remonter le ressort ? – Ce que je mange – Et que manges-tu ? – J'sais pas...des épinards – Et qu'est-ce qui fait pousser les épinards ? – Le soleil." »

165 Le mot « réservoir » figure à deux reprises sur cette question, dans l'énoncé et dans la première proposition. Il est probable qu'il y prenne deux sens différents. En effet, la réponse 1 étant correcte, le dihydrogène est considéré comme un réservoir d'énergie chimique, et l'énoncé peut être entendu comme « Une pile à combustible fonctionne avec un réservoir de réservoir d'énergie chimique ».

Prise en compte partielle des représentations des enseignants-stagiaires

Pendant l'ensemble de cette activité, les formateurs ont laissé les enseignants-stagiaires libres de poser des questions, mais ils n'ont pas cherché à interroger ceux qui avaient choisi des propositions erronées afin de connaître les raisons de leurs choix et d'en discuter.

Caractère renouvelable ou non d'une ressource

Dans la première question, il est fait mention du caractère renouvelable ou non du Soleil. Les formateurs considèrent que le Soleil « est une ressource renouvelable » (en vert sur la Figure 133). Suite à la remarque d'un enseignant-stagiaire, F1B annonce définir ce qu'il entend par « renouvelable », mais reste focalisé sur le Soleil et ne donne pas de définition générale :

« la définition de renouvelable c'est / c'est une définition très anthropocentrée hein // c'est / à l'échelle de la vie humaine // on peut considérer que c'est renouvelable on a quelques milliards d'années devant nous // on est tranquille » (F1B, F1-4, 63-65)

Quelques minutes plus tard, lors de la correction d'une autre question, il évoque le fait que le Soleil soit une ressource renouvelable à l'origine de ressources qui ne sont pas renouvelables (comme le pétrole), et présente ce raisonnement comme fallacieux :

« ça existe grâce à l'énergie transférée par le Soleil // ce qui fait faire des // si on va très loin on dit on peut / qu'on peut considérer que // le pétrole vient d'une énergie renouvelable // on se fait des nœuds au cerveau là // on arrive faire dire n'importe quoi » (F1B, F1-4, 133-136)

Nous supposons que le mot « renouvelable » n'a pas fait l'objet de discussions entre formateurs puisqu'il n'a pas été défini de façon formelle et ne sera pas évoqué dans la suite de la formation.

Rayonnement et transfert thermique

Dans le modèle scientifique scolaire proposé par les formateurs, quatre types de transferts sont identifiés (transfert mécanique, transfert électrique, transfert thermique et transfert par rayonnement), mais ils ne sont pas définis (§17.2).

Pendant la correction de la première question du QCM, la distinction entre transfert thermique et transfert par rayonnement est évoquée par F1B, à partir de la lecture de la deuxième proposition, considérée comme possiblement correcte, possiblement erronée :

« Du point de vue de l'énergie, le Soleil ne transfère de l'énergie que par rayonnement »

On peut supposer qu'il s'agit d'analyser le transfert énergétique qui a lieu entre le Soleil et la Terre. L'espace où a lieu le transfert étant essentiellement vide, il ne peut s'agir *a priori* que de transfert de type *rayonnement* (quelles que soient les définitions données aux expressions *rayonnement* et *transfert thermique*).

Pour F1B, déterminer si la proposition 2 est correcte ou non revient à répondre à la question :

« est-ce que // un transfert thermique c'est du rayonnement // ou à l'inverse est-ce que / un rayonnement // c'est toujours accompagné d'un transfert thermique » (F1B, F1-4, 36-37)

qui, selon nous, d'une part, ne peut pas être comprise sans avoir défini au préalable *rayonnement* et *transfert thermique*, d'autre part, est sans rapport avec la proposition 2.

F1B répond à la question (rhétorique) qu'il pose, en expliquant qu'il peut y avoir des transferts par rayonnement pendant lesquels le milieu ne chauffe pas. Il ajoute que les objets ne chauffent pas par rayonnement : c'est leur énergie interne qui augmente parce qu'ils ont reçu de l'énergie par rayonnement (F1-4, 35-53), puis il clôt son intervention en signifiant qu'à l'heure actuelle, en France, dans l'enseignement, « la règle c'est plutôt de distinguer le rayonnement et le transfert thermique », sans en donner de définition (F1-4, 57).

Lors de la correction de la question 3, F1B dit qu'il « considère » que la proposition 2 « Les ressources fossiles ne transfèrent de l'énergie que par rayonnement lors de leur combustion (...) n'est pas valide » (F1-4, 127-128), ce qui sous-entend qu'il est possible d'envisager que cette proposition soit correcte. Ceci serait pourtant en désaccord avec la définition du rayonnement en sciences (chap.2).

Présentation d'un choix de modèle scientifique scolaire de l'énergie

Dès le début de la correction du QCM, les formateurs expliquent que certaines réponses (en jaune sur les diapositives de correction) peuvent être considérées comme correctes ou non, en fonction de certains « choix » de définitions. Ces choix concernent d'une part les sens donnés aux concepts de rayonnement et de transfert thermique (voir paragraphe précédent), d'autre part la définition de ce qu'est une forme d'énergie. Pour les formateurs, « ce qu'on appelle forme d'énergie c'est ce qu'on peut stocker » (F1-4, 180-181), par opposition aux transferts d'énergie (F1-4, 186-187). De ce fait, ils présentent l'électricité et la lumière comme des phénomènes assimilés à des transferts d'énergie et non à des formes d'énergie (voire à de l'énergie), et affirment que leur modèle scientifique scolaire repose essentiellement sur cette distinction (F1-4, 197-199)

Tout au long de la correction du QCM, les formateurs insistent sur le fait que le modèle qu'ils proposent résulte d'un choix et que d'autres modèles existent (Texte 4).

F1-4, 54, 55, 56 : « on a fait des choix »

F1-4, 58 : « c'est pas le choix dans // partout de façon universelle »

F1-4, 172-174 : « on est très mal à l'aise sur cette question parce que j'ai pas envie de vous dire mon point de vue ça va vous mettre en porte à faux par rapport aux programmes // je suis en profond désaccord avec les programmes »

F1-4, 178 : « le point de vue que je défends c'est »

F1-4, 180 : « on va défendre l'idée que »

F1-4, 181-182 : « si on prend ce point de vue ce n'est pas le point de vue qui a pris les programmes »

F1-4, 185-186 : « donc c'est juste / voilà mon point de vue »

F1-4, 232 : « c'est ce qu'on va préconiser »

F1-4, 234-236 : « j'ai mis du temps à comprendre ce que l'institution portait comme définition des formes d'énergie vous avez peut être cherché moi j'ai jamais trouvé une définition de ce que c'est / de ce que c'était une forme d'énergie »

F1-4, 240-242 : « on a / fait acte de notre désaccord / mais en fait notre désaccord on a fini par comprendre que notre désaccord c'était sur la définition de formes d'énergie »

F1-4, 246-247 : « bon c'est une convention // ne soyons pas dogmatiques // on peut avoir différentes définitions »

Texte 4: citations exprimant le "choix" d'un modèle par les formateurs (partie 4 - QCM)

La plupart de ces propos laissent à penser que d'autres modèles, bien que différents, sont également acceptables et utilisables. Nous notons une évolution dans le discours des formateurs : au début de la correction du QCM, ils présentent leur modèle comme un choix *parmi d'autres*, mais, au fur et à mesure des questions qu'ils abordent, ils décrivent leur modèle comme plus pertinent ou plus performant que d'autres¹⁶⁶.

Dans la question 4 (Figure 136), la proposition « L'électricité est une forme d'énergie » est considérée comme à la fois correcte et incorrecte, selon le code couleur utilisé : elle est représentée en jaune. À la suite de cela, les formateurs décrivent longuement une partie de leur modèle et, en particulier, le fait qu'ils ne considèrent pas l'électricité comme une forme d'énergie, tout comme la lumière (F1B, F1-4, 170-188 ; F1B, F1-4, 234-245 ; F1B, F1-4, 246-257). Vient ensuite la correction de la question 5 (Figure 137), qui est très semblable à la question 4, mais qui s'intéresse à la lumière et non plus à l'électricité. Dans la diapositive de réponse, on remarque que la proposition « la lumière est une forme d'énergie » est alors considérée comme incorrecte : elle est représentée en rouge.

Les formateurs estiment leur définition d'une forme d'énergie plus claire et plus pertinente que celles que suggèrent les manuels et les programmes, et considèrent que leur modèle permet une meilleure compréhension du « défi énergétique » (F1-4, 202-207, 246-257) – mentionné à plusieurs reprises, mais sans être défini. D'après les propos qu'ils tiennent, le « défi énergétique » semble identifiable au besoin de réduire ou de ralentir l'utilisation des ressources énergétiques qui

¹⁶⁶ Nous n'affirmons pas ici qu'ils considèrent leur modèle comme supérieur à d'autres modèles issus de la recherche en didactique (mais plutôt à d'autres modèles habituellement rencontrés dans l'enseignement).

permettent de fournir de l'électricité. Le fait que l'électricité ne soit pas stockable est, selon eux, directement lié au problème que pose le « défi énergétique ». De leur point de vue¹⁶⁷, il n'est pas possible de comprendre cet enjeu sociétal si on considère l'électricité comme une énergie :

« mais comment je peux leur faire comprendre le défi de notre société sur l'énergie si l'énergie on la met en forme / l'énergie électrique on la met en forme et qu'elle est stockable // il n'y a plus de problème » (F1A, F1-4, 205-207)

« ça aide à comprendre le défi énergétique // c'est-à-dire que // il n'y a pas de réservoir d'énergie électrique » (F1B, F1-4, 247-248)

Modélisation de l'explosion de ressources fossiles

À la fin de la correction de la question 3 (Figure 135), un enseignant-stagiaire remarque que, s'il fait exploser une ressource fossile, cela va libérer de l'énergie mécanique (F1-4, 141-145). Selon lui, il y a donc un autre type de transfert à prendre en compte qu'un transfert thermique et un transfert par rayonnement. Dans cette question, le stagiaire part d'une situation, dans le monde des objets et des événements (une explosion), et tente de la modéliser (dans le monde des théories et des modèles).

Comme nous le mettons en évidence sur la Figure 138, F1B lui répond en décrivant le fonctionnement d'un moteur thermique (*a priori*, monde des objets et des événements), c'est-à-dire en parlant d'une situation différente de celle qui était évoquée par le stagiaire. Elle est assimilable à un modèle de la situation de départ (monde des théories et des modèles) :

« l'explosion // elle est liée en fait au / au thermique en fait // dans un moteur / en fait c'est parce que ça chauffe // qu'il y a / en fait le piston // c'est un convertisseur // de transfert thermique / en transfert mécanique » (F1-4, 146-148)

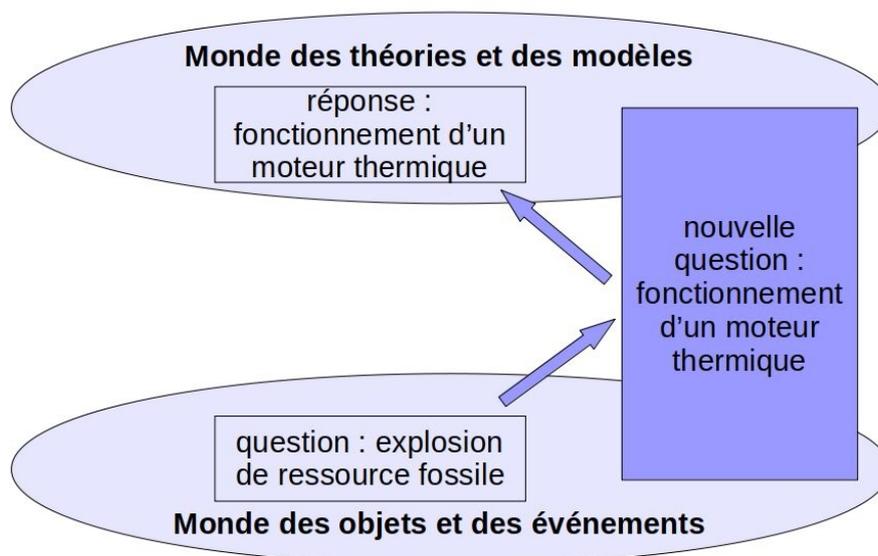


Figure 138: analyse du discours de réponse relatif à la question de l'explosion de ressources fossiles

167 Bien qu'ils le présentent comme une affirmation, que nous estimons qu'il s'agit plus d'un point de vue que d'une connaissance scientifique.

Tâche 5 : panneau solaire et moteur – analyse a priori

Descriptif

La consigne donnée aux enseignants-stagiaires est la suivante :

« Un panneau solaire alimente un moteur dont la puissance est deW

1°) Modélise cette situation par une chaîne énergétique

2°) Indique sur cette chaîne la puissance du moteur. » (annexe D, synopsis prévu, p.4)

Pendant la rencontre préparatoire, il est dit que, au cours de cette tâche, les enseignants-stagiaires doivent tracer une chaîne énergétique sans qu'on leur ait donné de méthodologie spécifique (RP-F1, 657-661), et doivent « interroger le lien (...) entre puissance et énergie » (RP-F1, 654-655), ce que corroborent certaines indications du déroulé :

« En groupe, puis correction ; annoncer le formalisme ; Objectif : faire émerger « les normes » possibles pour cette chaîne (vrai problème) ; On compare les différentes propositions et on donne la norme de représentation » (annexe D, synopsis prévu, colonne commentaire, p.4)

Cependant, le déroulé présente clairement cette tâche comme une application directe du « modèle » proposé pendant la formation pour la représentation des chaînes énergétiques, puisque la consigne suit les « deux diapos [qui] présentent le modèle proposé pour les élèves » (annexe D, synopsis prévu, p.4).

Objectif

Les formateurs supposent que tracer une chaîne énergétique sans avoir de méthodologie spécifique est difficile et que cette tâche permettra aux enseignants-stagiaires de prendre conscience de la nécessité de l'utilisation d'une norme commune (RP-F1, 657-663 ; 670-672 ; annexe D, synopsis prévu, colonne commentaire, p.4).

Remarques liées à l'organisation de la tâche

Cette tâche est peu détaillée dans la rencontre préparatoire (total de 32 lignes de transcription), et la manière dont elle doit se dérouler *a priori* n'a pas pu être clairement identifiée (éléments contradictoires précédemment mentionnés).

Durée prévue pour l'activité : 10 minutes de résolution et 15 minutes de discussion (annexe D, synopsis prévu, p.4 ; RP-F1, 788-790).

Tâche 5 : panneau solaire et moteur – analyse effective

Déroulement

Cette tâche commence après la distribution aux enseignant-stagiaires d'une fiche intitulée « Modèle de l'énergie » (annexes A, fin de transcription de F1-6), présentée par les formateurs comme le modèle de l'énergie tels qu'ils l'utilisent avec des élèves de 3^e.

Les formateurs projettent une diapo sur laquelle figurent les consignes d'un exercice :

« Un panneau solaire alimente un moteur à vide dont la puissance est de 0,5 W.

1° Modélise cette situation par une chaîne énergétique.

2° Indique sur cette chaîne la puissance du moteur. »

Ce travail peut être effectué seul ou en groupes (F1-6, 97-98) ; les enseignants-stagiaires travaillent en autonomie pendant environ 5 minutes.

La chaîne est ensuite corrigée : F1C commence par interroger les enseignants-stagiaires (« je commence par quoi ? », F1-6, 109), puis elle part de leurs réponses (F1-6, 111-113 : panneau solaire, considéré comme un convertisseur) pour tracer un début de chaîne, en expliquant quels codes elle utilise :

« tout le monde est bon (*elle trace un cercle au tableau et écrit en-dessous « panneau solaire »*) OK donc nous on prend le parti aussi d'écrire le // l'objet / en-dessous // et à l'intérieur s'il y a une forme d'énergie on en met une / ici on a un convertisseur un convertisseur ne stocke pas d'énergie // donc il n'y a rien à mettre dedans // OK panneau solaire / bah du coup si c'est un convertisseur il reçoit au moins un / transfert et il // il renvoie au moins un // donc qu'est-ce que je mets (*elle trace une flèche à gauche du cercle, qui pointe sur le cercle*) » (F1A, F1-6, 113-118)

Ce sont les enseignants-stagiaires qui suggèrent d'écrire « rayonnement », « électricité » et « transfert thermique » sur les flèches qui arrive et partent du convertisseur (F1-6, 119-122).

Un échange relatif à la dénomination des transferts avec les élèves a alors lieu (F1-6, 125-130).

F1C demande ensuite ce qu'elle « met à gauche (...) et à droite » (F1-6, 132) ; à la suite des réponses données par les enseignants-stagiaires (Soleil, énergie nucléaire), elle complète le schéma au tableau, disant que le Soleil est un réservoir et choisissant de le représenter par un rectangle en-dessous duquel elle écrit « Soleil » et à l'intérieur duquel elle écrit « énergie nucléaire » (F1-6, 134-135). Puis F1C demande comment compléter la chaîne (F1-6, 146 : « OK et puis après ? »). Un stagiaire suggère de « met[tre] le moteur » (F1-6, 147), et F1C complète la chaîne :

« F1C : moteur (*elle trace un cercle à droite de la flèche « électricité » sous lequel elle écrit « moteur »*) oui je / j'ai dessiné déjà en fait sans vous demander // pardon / donc on est bien d'accord que le moteur / pareil // il ne va pas stocker de l'énergie / il va faire un changement de transfert et donc //

S : transfert mécanique (*F1C trace une flèche qui part de la droite du cercle « moteur » et va vers la droite, sur laquelle elle inscrit « transfert mécanique »*) » (F1-6, 148-154)

La question de la représentation des « transferts thermiques » associés à des « pertes d'énergie » (F1-6, 156-157) est posée par un enseignant-stagiaire. Il lui est répondu qu'il est possible de les représenter si le système considéré n'est pas idéal (F1-6, 158-160) ; cette question sera à nouveau abordée par la suite :

« F1B : c'est que // parce qu'en fait on est gênés // dès dès / dès qu'on met les pertes hein (il fait des gestes de la main depuis les différents éléments de la chaîne vers le bas du tableau) // ça chauffe partout là

F1C : oui / oui

F1B : dès qu'on met des / des transferts thermiques il faudrait aussi mettre / bah voilà environnement partout // voilà / donc ça complexifie vachement les chaînes même si /

on peut le faire // et puis il y a un petit biais c'est que / on envoie avec ça le message que le réchauffement climatique il est lié à toutes les pertes de nos appareils //

F1A : alors vous arrivez à le

F1B : parce que ça chauffe partout // donc il y a des élèves qui pensent que le réchauffement climatique c'est parce qu'on utilise des appareils quoi // il faut quand même / se méfier / des idées qu'on envoie // » (F1-6, 269-280)

Une discussion a lieu entre les formateurs et un enseignant-stagiaire, sur une question sémantique et conceptuelle liée aux transferts d'énergie (F1-6, 161-205 ; nous y reviendrons dans l'analyse).

F1A et F1C parlent ensuite de la pertinence de la représentation d'un « réservoir final » (F1-6, 230-265 ; voir section précédente).

Puis la seconde question est abordée et donne lieu à un échange, que nous reproduisons ci-après (Texte 5), et qui sera complété par les objectifs et propositions de F1A relatifs à l'enseignement de la puissance au collège (F1-6, 230-333).

F1C : du coup ma puissance / je reviens sur ma puissance où est-ce que je mets ma puissance ? (*silence 6 secondes*) ça sera près du moteur déjà mais / où est-ce que je la mets ? // à l'entrée ? /

S : j'aurais plutôt tendance à dire à la sortie

S : s'il y a conservation elle y est tout le temps en fait //

F1C : alors s'il y a conservation / s'il n'y a pas conservation et que je mets le transfert thermique ? (*elle rajoute une flèche qui part du moteur et qui pointe vers le bas et vers la droite*) // est-ce que là on vous précise quoi que ce soit ? // on ne sait pas si c'est une puissance / nécessaire à l'entrée ou si c'est la puissance qui ressort à la fin // mais on est bien d'accord que c'est sur les flèches // donc la puissance en fait c'est / les transferts // ça caractérise les transferts // on ne va pas le mettre à l'intérieur //

S : c'est le transfert électrique ou le transfert mécanique ?

F1B : il faut choisir /

F1C : et là ça dépend de la situation / l'énoncé ne nous permet pas de conclure comme ça

F1B : en fait l'énoncé il est tout pourri quoi // (*rires*) non mais franchement / moi je sais pas // franchement je ne sais pas // c'est un énoncé tout pourri

Texte 5: échange relatif à la "puissance du moteur"

Analyse

Pendant la correction, F1C trace la chaîne énergétique au tableau, en interrogeant les enseignants-stagiaires. Le Tableau 16 récapitule l'ensemble des éléments à prendre en considération pour tracer cette chaîne et met en évidence ceux qui ont été à la charge des enseignants-stagiaires (en bleu), ceux qui ont été à la charge des formateurs (en rose) et ceux qui n'ont pas été évoqués (en vert).

objet ou événement considéré	nature	forme à tracer	ce qu'il faut écrire sous ou sur la forme	ce qu'il faut écrire dans la forme
panneau solaire	convertisseur	cercle	panneau solaire	(rien)
« ça brille » ¹	transfert	flèche	transfert par rayonnement	(NA)
« électricité » ¹	transfert	flèche	transfert électrique	(NA)
« ça chauffe » ¹	transfert	flèche	transfert thermique	(NA)
Soleil	réservoir	rectangle	Soleil	énergie nucléaire
moteur	convertisseur	cercle	moteur	(rien)
« ça bouge » ¹	transfert	flèche	transfert mécanique	(NA)

¹Nous reprenons les termes que les formateurs ont choisi d'utiliser pendant la formation, voir §17.2

	proposition enseignant-stagiaire
	proposition formateur
	non explicité

Tableau 16: éléments pris en charge par les formateurs et par les enseignants-stagiaires dans le tracé de la chaîne (tâche 5)

On remarque que 18 éléments de correction ont été apportés par les formateurs alors que 9 ont été apportés par les enseignants-stagiaires, ce qui traduit une correction de la tâche essentiellement prise en charge par les formateurs.

Par ailleurs, ce tableau indique un niveau de modélisation faible : les événements associés à des transferts n'ont jamais été explicités, et les objets considérés (panneau solaire, Soleil et moteur) n'ont pas été dissociés des systèmes qui les représentent (la distinction objet / système n'a pas été évoquée ; aucune occurrence pour le mot « système » pendant l'ensemble de l'activité considérée).

Pendant la correction, une discussion a lieu autour des expressions « recevoir un transfert » et « donner un transfert », qui sont utilisées par les formateurs. Un enseignant-stagiaire leur faire remarquer que ce qui est transféré et donné, c'est de l'énergie, et non un transfert (F1-6, 161-166). Dans un premier temps, les formateurs ne comprennent pas cette remarque (F1-6, 167-183). F1B explique alors que, pendant un transfert, « ce qu'on qualifie c'est / la façon dont l'énergie est transférée » (F1-6, 188), puis précise que, puisqu'il « a fait le choix qu[e l'énergie transférée] n'avait pas de forme » (F1-6, 203), il ne peut pas qualifier la nature de l'énergie pendant son transfert (F1-6, 196-203). Cette discussion met en évidence, d'une part, des habitudes langagières des formateurs (qui continueront par la suite d'utiliser les expressions « recevoir » et « donner » un transfert), et, d'autre part, une difficulté liée au modèle scientifique scolaire utilisé.

À travers cette tâche sont également évoquées les « pertes » d'énergie, à l'initiative d'un enseignant-stagiaire, qui suggère de les représenter sur la chaîne. Cette proposition n'est pas retenue par les formateurs, dans un premier temps sans raison (F1-6, 158-160). Dans un deuxième temps, ce sont les formateurs qui évoquent les « pertes » d'énergie et assument de ne pas les représenter, arguant qu'elles « complexifie[nt] vachement les chaînes » (F1-6, 274). La question de la nature de ces « pertes » n'est pas discutée, il est seulement mentionné qu'elles font référence à un « fonctionnement [non-]idéal »¹⁶⁸ (F1-158-160). Lors de la correction de la seconde question, qui

¹⁶⁸ On peut remarquer que c'est le « fonctionnement » de l'objet et non le système considéré qui est qualifié de non-idéal.

concerne la manière de représenter sur la chaîne la « puissance du moteur », un enseignant-stagiaire fait remarquer que l'absence de prise en considération des « pertes » implique que les puissances associées aux transferts entrant et sortant sont égales (F1-6, 286), à la suite de quoi F1C rajoute une flèche « transfert thermique » en sortie du moteur (F1-6, 287-288), sans discuter de cette représentation (c'est-à-dire sans expliciter la modélisation des « pertes »).

Enfin, soulignons que cette tâche a permis aux formateurs de donner à de multiples reprises des conseils aux enseignants-stagiaires relatifs à l'enseignement de l'énergie dans leurs classes : progressivité dans les mots utilisés pour parler des transferts (F1-6, 125-130) et des formes d'énergie (F1-6, 139-141), progressivité quant à la représentation du réservoir final ou non (234-265), comparaison entre les modes de transfert d'énergie et les modes de transport (F1-6, 191-195), discussion et présentation par les élèves du modèle scientifique scolaire de l'énergie vu en physique avec les enseignants de SVT et de technologie (F1-6, 213-220).

Comparaison à la tâche prévue

Pendant la rencontre préparatoire, cette tâche a été présentée comme un exercice *précédent* la présentation du modèle scientifique scolaire de l'énergie par les formateurs, qui devait permettre aux enseignants-stagiaires de prendre conscience de la difficulté de tracer une chaîne énergétique sans normes claires et partagées par tous (RP-F1, 657-663, 670-672 ; annexe D, synopsis prévu, colonne commentaire, p.4).

Elle a finalement été proposée comme une application directe des règles de construction des chaînes, qui avaient été données aux enseignants-stagiaires peu de temps auparavant (conformément à certaines indications du déroulé).

Durée : environ 20 minutes (5 minutes de résolution + 15 minutes de correction), auxquelles on peut ajouter la durée correspondant à la présentation du modèle (2'42"). Pour rappel et pour comparaison, il était prévu 10 minutes de résolution et 15 minutes de discussion.

Tâche 6 : chaînes énergétiques – analyse a priori

Descriptif

En groupe, les enseignants-stagiaires doivent tracer une chaîne énergétique pour un smartphone, une centrale thermique, une centrale hydraulique, une centrale éolienne, une voiture à essence ou une voiture électrique (annexe D, synopsis prévu, p.5).

Objectif

D'après le synopsis prévu (p.5), l'objectif est de « faire travailler la problématique du système Terre-charge », « représenter les conversions internes à un système¹⁶⁹ », et questionner « le réservoir initial ».

Il s'agit *a priori* d'une activité de modélisation, dans laquelle les enseignants-stagiaires sont amenés à passer du monde des objets (smartphone, centrale thermique, centrale hydraulique, centrale éolienne, voiture à essence, voiture électrique) au monde théorique (chaînes énergétiques).

169 Nous ne savons pas dans quelle mesure cette expression fait référence aux transformations d'énergie ; elle ne sera pas reprise pendant la formation.

La question de la représentation d'un objet – et non d'un événement – par une chaîne énergétique, supposée être la représentation d'une situation, pose toutefois question.

Cette tâche suit la présentation du « modèle » de l'énergie (annexes A, fin de transcription de F1-6) aux enseignants-stagiaires : on peut supposer qu'il s'agit de faire utiliser ce modèle et de faire appliquer les règles de représentation proposées pour les chaînes énergétiques aux enseignants-stagiaires.

Remarques liées à l'organisation de la tâche

Le contenu de cette tâche n'est pas détaillé pendant la rencontre préparatoire et les corrections des chaînes ne sont pas évoquées (ni discutées, ni présentées).

Durée prévue pour l'activité : 40 minutes de résolution et 20 minutes de correction et discussion (annexe D, synopsis prévu, p.5 ; RP-F1, 795-796 ; 876).

Tâche 6 : chaînes énergétiques – analyse effective

Déroulement

Les formateurs ont présenté les règles de représentation des chaînes énergétiques aux enseignants-stagiaires, puis ils leur ont proposé un exercice d'application qui a été corrigé (voir ci-avant, tâche 5). La consigne de la tâche suivante est présentée dans une diapositive, que nous reproduisons ci-après (Figure 139), affichée quelques minutes avant la pause déjeuner. F1A répartit les chaînes à tracer (une par groupe de deux ou trois enseignants-stagiaires) ; la lampe à manivelle n'est attribuée à aucun groupe (F1-7, 7-12).

3- Utilisation d'un modèle de l'énergie
En groupe, faire une chaîne énergétique
pour (une feuille A3 par chaîne) :

- Un smartphone 
- Une centrale hydraulique 
- Une centrale thermique 
- Une éolienne 
- Une voiture électrique qui roule 
- Une voiture thermique qui roule 
- Une lampe à manivelle, qu'on charge, puis qu'on utilise 

Pour 1 minute de manivelle 30 minutes d'éclairage

Figure 139: consigne tâche 6 (diapo 73)

Après la pause déjeuner, il est laissé 4 minutes aux enseignants-stagiaires pour tracer ces chaînes (F1-7, 16-17). Les formateurs passent dans les rangs sans intervenir.

Pour la correction de la première chaîne, F1A interroge le groupe ayant travaillé dessus et représente la chaîne au tableau (Figure 140 : photographie de la chaîne finale obtenue).

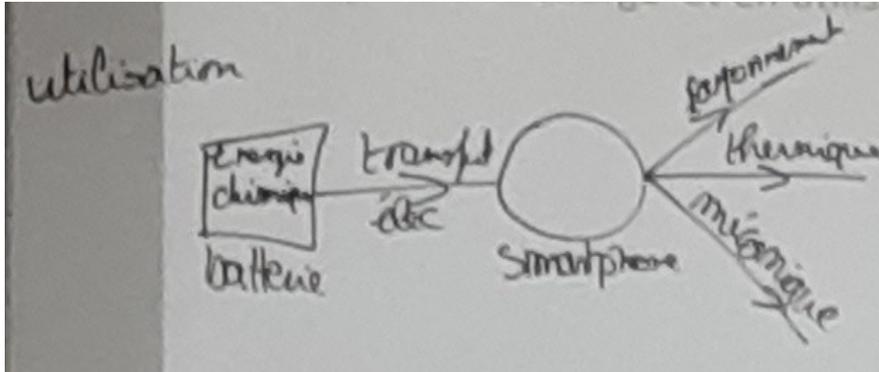


Figure 140: correction de la chaîne énergétique associée à un smartphone en utilisation

Les échanges ayant conduit à cette représentation ont été reproduits ci-après (Texte 6, F1-7, 22-24 ; 52-87).

F1A : vous avez commencé votre chaîne comment ? *(elle s'adresse au groupe qui a travaillé sur le smartphone)*

S : par la batterie /

F1A : (...) alors / batterie / je suppose que / je n'ai pas demandé mais c'est le réservoir ? *(elle trace un rectangle sur la gauche du tableau, en-dessous duquel elle écrit « batterie »)* /

S : énergie chimique

F1A : ouais *(elle écrit « énergie chimique » dans le rectangle)* // OK / euh après vous faites quoi ? en charge ou en utilisation ?

F1C : en charge ou en utilisation ?

S : là pour le coup ce sera en utilisation

F1A : alors d'abord on commence |- / oui / voilà

S : on va estimer qu'elle est -| chargée

F1A : utilisation *(elle ajoute « utilisation » en haut à gauche)* / après qu'est-ce qu'il y a ?

S : un transfert électrique

F1A : voilà *(elle trace une flèche qui part du côté droit du rectangle sur laquelle elle inscrit « transfert élec »)* //

S : le smartphone qui est une grosse boîte qui va faire plein de choses *(F1A trace un cercle à l'extrémité de la flèche, en-dessous duquel elle écrit « smartphone », et une flèche qui part de la droite du cercle)*

F1C : la boîte noire

F1A : j'en mets forcément un sans vous demander parce que je sais que si vous m'annoncez un convertisseur il faut un transfert sortant

S : ben on met trois autres transferts en sortie

F1A : trois autres transferts / donc

S : rayonnement thermique |- et

F1A : alors là *(elle ajoute deux flèches qui partent du même point du cercle, une se dirigeant en haut à droite, l'autre en bas à droite, puis elle inscrit « élec » sur celle du haut)* -| je n'écris pas transfert avec mes élèves je me force à écrire / euh non j'écris une bêtise // non non excusez moi c'est moi qui euh *(elle cherche le tampon effaceur puis elle efface)* // alors j'ai / j'ai devancé / rayonnement ? *(elle écrit « rayonnement » sur la flèche du haut)*

S : thermique

F1A : thermique *(elle écrit « thermique » sur la flèche du milieu)* // et quel autre ?

S : mécanique

F1A : mécanique / *(elle écrit « mécanique » sur la flèche du bas)* juste pour être sûre le mécanique c'est par rapport à quoi ?

S : par rapport au son / qui sort du téléphone /

F1A : ouais / ou vibreur ou ils disent euh le son

Texte 6: échange relatif au tracé de la chaîne énergétique associée à un smartphone en utilisation (F1-7, 22-24 ; 52-87)

Par la suite, est évoqué le fait que plusieurs chaînes différentes peuvent représenter la même situation. Dans le cas présent (smartphone en utilisation), il aurait été possible de représenter trois convertisseurs : un haut-parleur, des del et « le thermique » ou « conducteur ohmique » (F1-7, 117-118 ; 152-153). Pour illustrer ces propos, F1A trace une seconde chaîne (Figure 141 : photographie de cette chaîne).

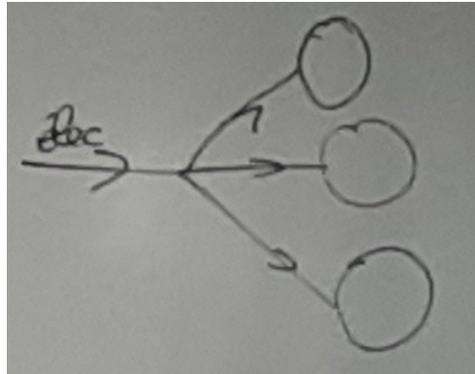


Figure 141: correction de la chaîne associée à un smartphone en utilisation (représentation alternative)

Un enseignant-stagiaire demande des précisions concernant ce qu'il faut écrire « sous le réservoir » (F1-7, 125) : dans le cas présent, s'agit-il de la batterie ou des « réactifs chimiques » (F1-7, 132) ? F1A lui répond qu'elle « ne marque pas le nom de la matière qui est à l'origine de l'énergie chimique » (F1-7, 145).

Pour corriger la chaîne associée à un smartphone en charge, F1A modifie la première chaîne qu'elle a tracée, en demandant aux enseignants-stagiaires ce qu'il faut enlever (F1-7, 161-162). L'échange qui permet le tracé de cette chaîne (Figure 142) est reproduit ci-après (Texte 7, F1-7, 161-199).

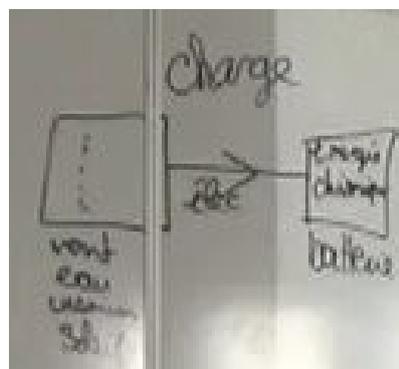


Figure 142: correction de la chaîne associée à un smartphone en charge

F1A : pour la / pour la charge si on fait que charger alors qu'est-ce que j'efface si je ne fais que charger ?

S : la fin il ne faut mettre |- le smartphone

F1A : voilà -| voyez là c'est pas un truc à faire avec les élèves parce que effacer reprendre euh ils s'y perdent / mais si on est en charge a priori et que la charge / ça (*elle efface les trois flèches « mécanique », « rayonnement » et « thermique » de la chaîne « smartphone en utilisation »*) bah on n'en a plus besoin / même ça (*elle efface le cercle et l'indication « smartphone » de la chaîne « smartphone en utilisation »*) / et on modifierait quoi en amont ? (*elle efface « utilisation » et écrit « charge » à la place - chaîne « smartphone en utilisation »*) // donc c'est la batterie qui devient le récepteur / donc il reçoit un transfert (*elle trace une flèche à gauche du rectangle « batterie », qui va vers ce rectangle - chaîne « smartphone en charge »*) un transfert qui est quoi ?

S : électrique

F1A : électrique / donc là on met transfert vous écrivez bien élec (*elle inscrit « élec » - chaîne « smartphone en charge »*) / ce transfert il ne vient pas de nulle part /

S : bah il y a le chargeur (*brouhaha*)

F1A : ouais voilà alors eh / euh juste une chose (*elle représente un rectangle à gauche de la flèche - chaîne « smartphone en charge »*) tout à l'heure j'ai d'une manière un peu excessive j'ai dit moi en sixième je ne veux pas d'objet électrique / est-ce que vous voyez que dès qu'on est sur les objets électriques et leur utilisation / on est quand même face à des réservoirs au départ qui sont un peu compliqués à faire comprendre // moi quand je vois des livres de sixième qui me font l'analyse énergétique de tous les moyens de production l'éolienne le barrage et tout / moi je trouve ça complexe / parce que là euh je vous attends on met quoi ? (*elle montre sous le rectangle qu'elle vient de tracer - chaîne « smartphone en charge »*) / si c'est le réseau est-ce que le réseau c'est tant le réservoir ? / ce qu'on appelle le réseau électrique // parce que vous voyez ce que je veux / moi le réseau pour moi c'est c'est les grands poteaux avec les fils comme disent les les voilà / donc là c'est c'est compliqué à mettre / parce que à un moment vous voyez des fois en parlant vite moi je me revois une fois j'ai dit c'est les centrales / non qu'est-ce que je venais pas de dire c'est pas les centrales / les centrales ce sont des convertisseurs plus / donc il faut vachement préparer donc là ça serait // le bidule qui est utilisé par la centrale // donc euh hmm
hmm

F1C : ou alors vous ne mettez pas de réservoir et vous mettez réseau EDF

F1A : mais moi réseau EDF vous voyez ça peut faire débat entre nous on vous montre juste qu'on qu'on fait pas de la même façon et F1B va prendre la parole sûrement pour dire qu'il fait autrement / (*rires*) / mais moi est-ce que vous voyez pourquoi le mot réseau me perturbe ? / parce que le réseau quand vous demandez aux élèves ils l'identifient bien aux fils / aux grands fils qu'il y a dans les pylônes / et là je trouve que c'est logique qu'on ne dise pas que c'est le réseau // maintenant dire centrale ce n'est pas top / et dire euh / bah tout / tout tout tous les trucs alors ça peut être de l'eau / alors des fois on fait ça moi il y a une année ils étaient tellement à fond (*elle écrit sous le rectangle : « eau vent uranium Soleil » - chaîne « smartphone en charge »*) et alors on mettait eau vent uranium / euh Soleil / et là on était d'accord bon comme ils y sont tous (*elle ajoute des tirets dans le rectangle - chaîne « smartphone en charge »*) / il y a presque toutes les formes

Texte 7: échange relatif au tracé de la chaîne énergétique associée à un smartphone en charge (F1-7, 161-199)

À la suite de cette correction, les formateurs donnent des conseils qui concernent les différentes chaînes énergétiques à effectuer avec leurs élèves relatives à une même situation, qui diffèrent selon les objectifs d'apprentissage visés (F1-7, 200-260).

Les corrections suivantes suivent toutes le même déroulement : les formateurs projettent une chaîne corrigée, ils demandent ensuite au groupe ayant travaillé dessus si la chaîne qu'ils ont construite est similaire à celle projetée, puis au reste des enseignants-stagiaires s'ils ont des remarques ou des questions. Les chaînes projetées sont représentées ci-après (Figure 143, Figure 144, Figure 145, Figure 146, Figure 147).

- centrale hydraulique

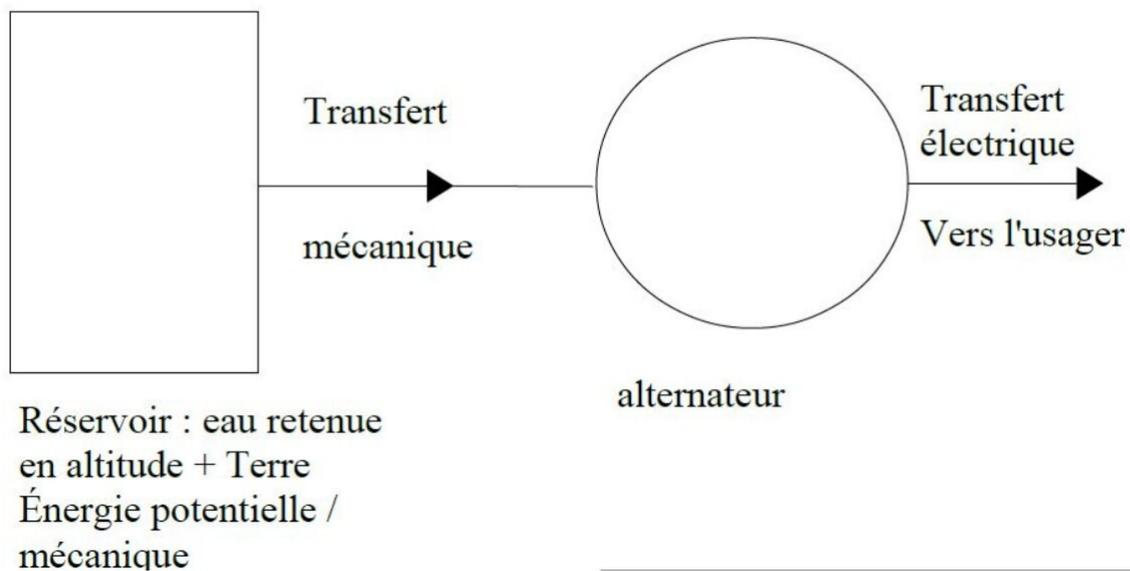


Figure 143: chaîne énergétique associée à une centrale hydraulique (correction projetée)

Les enseignants-stagiaires qui ont travaillé sur la centrale hydraulique se sont posé la question de la représentation de « la conversion énergie potentielle en énergie cinétique », qu'ils ont finalement choisi de ne pas représenter (F1-7, 271-273).

Des discussions sur la représentation des « pertes » (F1-7, 305-333) et sur le formalisme attendu dans un contexte d'évaluation institutionnelle (F1-7, 339-356) ont ensuite lieu.

- centrale thermique fossile

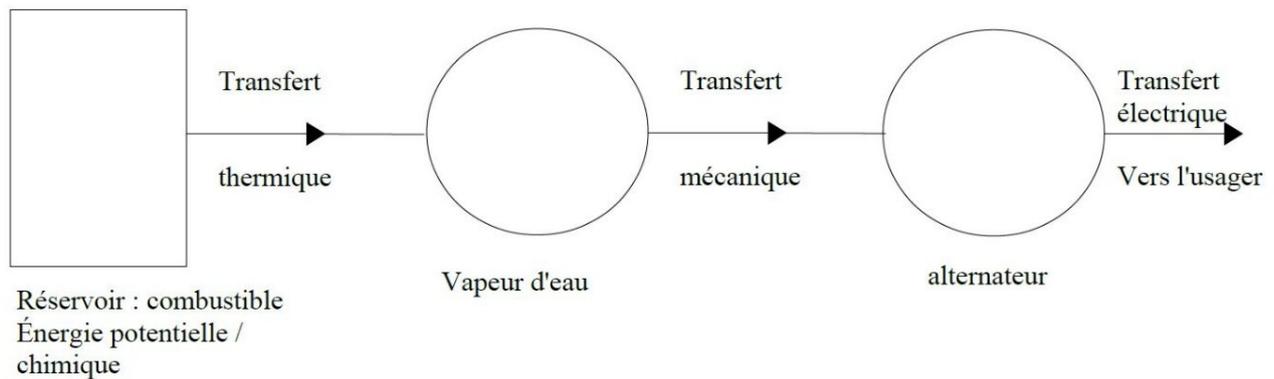


Figure 144: chaîne énergétique associée à une centrale thermique fossile (correction projetée)

Après la projection de la chaîne énergétique associée à une centrale thermique fossile (Figure 144), F1C fait remarquer que le réservoir initial devrait être « combustible + dioxygène » (F1-7, 359).

Un enseignant-stagiaire exprime des réserves au sujet du convertisseur « vapeur d'eau », qu'il souhaite remplacer par « turbine ». F1A F1B et F1C pensent également que « vapeur d'eau » n'est pas un convertisseur pertinent – sans argumenter ce positionnement :

« oui oui moi je mets plus la turbine aussi mais euh / » (F1A, F1-7, 377)

« moi je ne mettrais pas vapeur d'eau mais euh » (F1B, F1-7, 378)

« non / je ne mettrais pas vapeur d'eau mais je ne mettrais pas turbine » (F1C, F1-7, 379)

Ils ajoutent qu'il faut accompagner ce genre d'exercices de documents permettant à l'élève d'« identifier » « le nom du système » (F1-7, 384-385). La place de la chaudière dans la chaîne est également discutée ; il y a consensus pour dire qu'elle est « dans le réservoir » initial (F1-7, 392-397).

Comme précédemment, les formateurs insistent sur le fait qu'il n'existe pas de représentation unique pour chaque situation :

« il n'y a pas de bonne réponse » (F1B, F1-7, 406)

« il n'y a pas de bonne réponse si ça fait |- débat entre nous *a priori* » (F1B, F1-7, 408)

« pour moi c'est franchement des corrections où il faut être dans le débat parce que (...) il y a quand même plusieurs façons de voir » (F1A, F1-7, 409-412)

« les deux s'entendent » (F1C, F1-7, 414)

et que, lors d'une évaluation institutionnelle (DNB), les réponses considérées comme correctes sont nombreuses (F1-7, 416-429).

- centrale éolienne

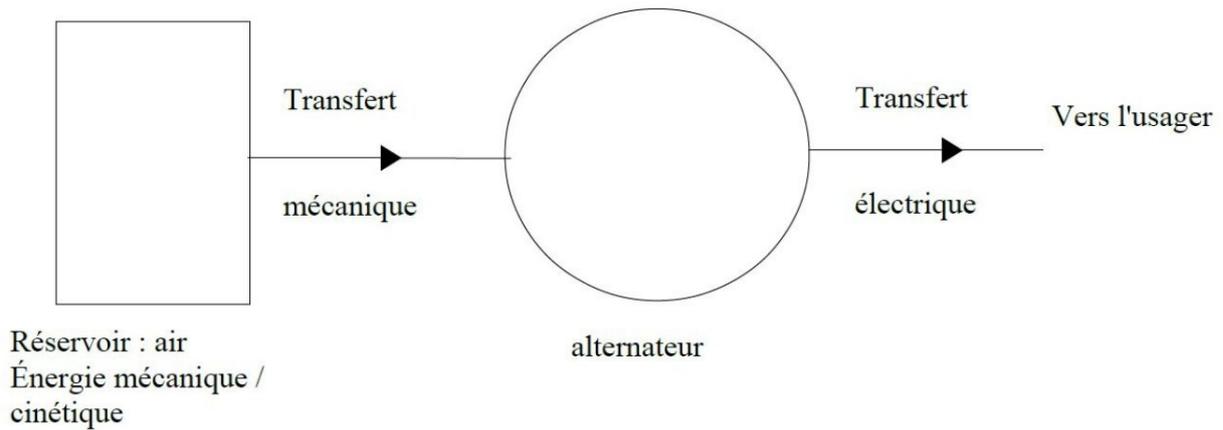


Figure 145: chaîne énergétique associée à une centrale éolienne (correction projetée)

Lors de la projection de la chaîne associée à la centrale éolienne (Figure 145), les formateurs remarquent et font remarquer aux enseignants-stagiaires que les chaînes présentées ne suivent pas complètement le formalisme attendu : les formes d'énergie sont indiquées *sous* le rectangle et non *dans* le rectangle (F1-7, 434-442). Aucune question ou remarque n'est faite au sujet de la centrale éolienne.

- voiture électrique

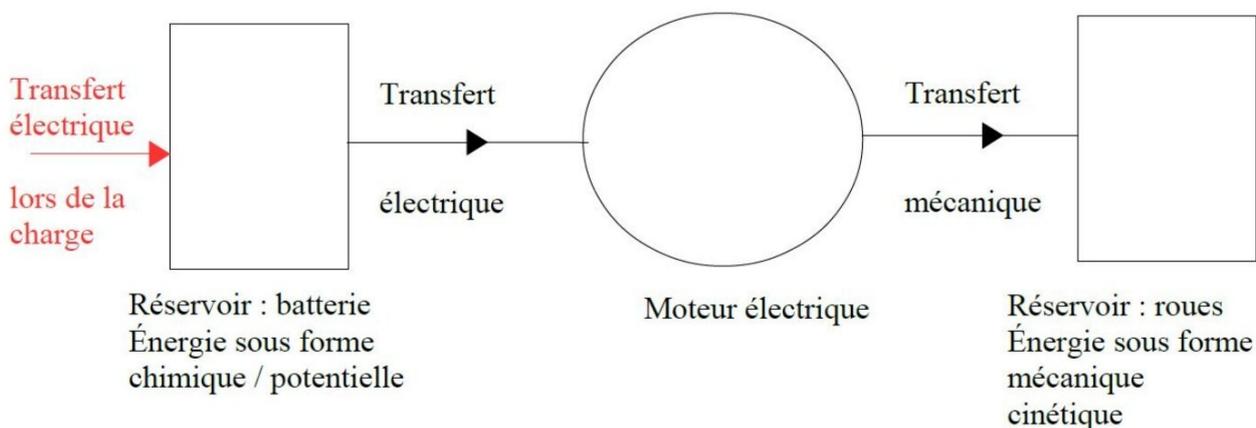


Figure 146: chaîne énergétique associée à une voiture électrique (correction projetée)

En ce qui concerne la voiture électrique (Figure 146), les enseignants-stagiaires interrogés soulignent que, puisque la voiture roule, ils n'ont pas indiqué de transfert électrique lors de la charge (F1-7, 447-448). L'identification du réservoir final leur a posé problème (F1-7, 448-456) ; les formateurs conseillent de ne pas prendre en considération le réservoir final, à moins d'avoir un document à disposition permettant aux élèves de l'identifier (F1-7, 458-460).

F1A explique ensuite que l'intérêt de faire faire cette chaîne aux élèves est de la comparer à celle associée à une voiture thermique, c'est-à-dire : comparer le fonctionnement d'un moteur électrique et d'un moteur thermique (F1-7, 464-476 ; les deux chaînes Figure 146 et Figure 147 sont projetées successivement ; 477-485).

- voiture thermique « classique »

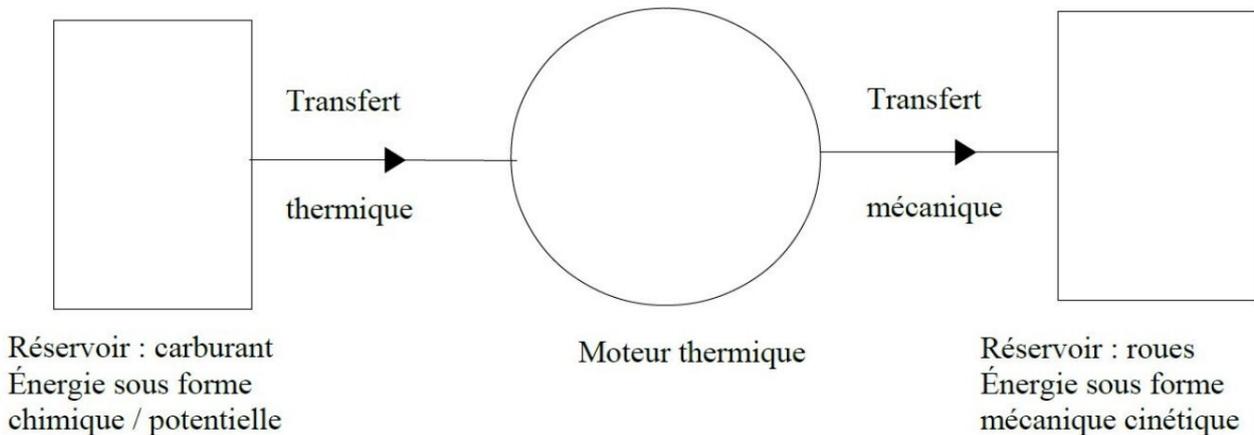


Figure 147: chaîne énergétique associée à une voiture thermique (correction projetée)

F1A précise ensuite que les chaînes permettent aux élèves d'identifier des transformations, mais ne leur permettent pas de les expliquer :

« les élèves vont vous amener à analyser à l'intérieur du système // et moi à un moment euh ce que je leur dis c'est que ces chaînes elles ne sont pas faites pour ça // donc ça c'est une vraie limite / c'est-à-dire qu'à un moment / par ces chaînes énergétiques je n'explique pas euh // pourquoi la transformation chimique de la matière libère de la chaleur // je leur demande de l'identifier » (F1A, F1-7, 498-502).

Analyse

De l'objet à la situation, de la situation à la modélisation

La chaîne énergétique a été présentée comme la représentation d'une situation, d'un événement ou d'un objet en fonctionnement, *via* l'utilisation d'un modèle scientifique scolaire de l'énergie. Or, l'énoncé initial demande le tracé de chaînes associées à des objets (Figure 139) dont, pour la plupart, on ne dit rien du fonctionnement (smartphone, centrales). Les voitures « roulent », mais on ne connaît pas leur mouvement (leurs variations d'énergie ne sont pourtant pas les mêmes si elles ont un mouvement rectiligne uniforme, si elles freinent, si elles montent, etc.)

Dès le début de la correction, F1B remarque et critique le fait que l'énoncé sur lequel ont travaillé les enseignants-stagiaires (Figure 139) ne précise pas le fonctionnement du smartphone qu'il faut représenter par une chaîne énergétique :

« en fait vous auriez dû vous rebeller hein vous êtes trop dociles / moi on me dit fais la chaîne énergétique du smartphone je gueule / je dis je ne peux pas » (F1B, F1-7, 31-32)

Une fois pris en considération le fonctionnement de l'objet d'étude (de façon implicite ou explicite), les chaînes énergétiques sont tracées et peuvent être explicitées. *A priori*, leur réalisation implique une activité de modélisation (travail entre le monde empirique et monde théorique). Pour ce faire, les objets sont décomposés en systèmes dont on identifie le fonctionnement, en leur associant la fonction de convertisseur ou celle de réservoir (voir §17.2).

Cependant, pendant la correction, F1C demande à ce que le nom de l'« objet ou phénomène » soit inscrit sous le rectangle qui représente le réservoir (F1-7, 128). Plus tard, la question de la définition du système n'est pas posée de façon explicite, mais elle est clairement évoquée : dans le cas du réservoir de début de chaîne associée au fonctionnement du smartphone, faut-il prendre en considération la batterie en elle-même ou les réactifs chimiques (voire les substances chimiques) (F1-7, 130-153) ? À l'inverse, à la fin de l'activité, la chaîne associée à la voiture thermique amène les formateurs à situer explicitement le réservoir initial (système) dans le monde des modèles, et à le séparer du monde des objets et des événements en soulignant qu'il est essentiel de ne pas confondre ce type de réservoir avec le réservoir de carburant de la voiture (F1-7, 520-523).

Règles de représentation

Certains éléments de ces chaînes ne correspondent pas aux attendus annoncés par les formateurs lors de la présentation de leur modèle scientifique scolaire de l'énergie.

Les formes d'énergie proposées dans les chaînes projetées ne correspondent pas à celles qui figurent dans les documents donnés aux enseignants-stagiaires (Fiche « modèle de l'énergie », annexes A, fin de transcription de F1-6) :

- centrale hydraulique : « énergie potentielle / mécanique » ;
- centrale thermique fossile : « énergie potentielle / chimique » ;
- centrale éolienne : « énergie mécanique / cinétique » ;
- voiture électrique : « énergie sous forme chimique / potentielle » ;
- voiture thermique : « énergie sous forme chimique / potentielle ».

Il est possible que cette double dénomination corresponde à un mélange entre les deux classifications de formes d'énergie qui ont été proposées dans l'exposé théorique de F1B (voir §17.2) ; aucun enseignant-stagiaire n'a posé de question à ce sujet.

Par ailleurs, ces formes d'énergie ne sont pas écrites dans les rectangles (F1C le remarque pendant la correction, sans que cela amène de discussions : F1-7, 434-442).

La flèche rouge représentée sur la chaîne associée à la voiture électrique (Figure 146) ne correspond pas aux normes annoncées. Elle évoque un événement passé et est incompatible avec une chaîne « pendant ».

Il apparaît que le formalisme attendu dans le tracé des chaînes par les formateurs est plus souple que prévu.

Pour chaque situation, les formateurs insistent sur la possibilité de tracer plusieurs chaînes différentes, mais valides. Le convertisseur de la chaîne associée à la centrale thermique et le réservoir final des chaînes associées aux voitures posent particulièrement problème, et les formateurs n'ont pas de réponse ferme ou de proposition consensuelle à apporter (F16-7, 373-382 ; 448-462). À plusieurs reprises, ils évoquent la difficulté de choisir les systèmes à représenter, et

proposent de mettre à disposition des élèves des documents leur permettant d'identifier ces systèmes (F1-7, 369-371 ; 383-385 ; 458-460 ; 504-516 ; 535-539).

F1B précise que la coexistence de différentes chaînes pour une même situation n'est pas le signe de définitions différentes, mais de multiples choix de modélisation :

« non ça ne dépend pas comment on définit les choses ça dépend comment on les modélise // ce n'est pas la même chose // ce n'est pas une question de définition / c'est une question de choix il faut assumer ses choix // |- il n'y a pas de bonne réponse »
(F1B, F1-7, 404-406)

Conseils pour les enseignants-stagiaires à destination des élèves

Tout au long de la correction, les formateurs (et en particulier F1A) ont donné des conseils aux enseignants-stagiaires pour qu'ils puissent aider leurs élèves dans la réalisation de chaînes énergétiques.

F1A suggère de laisser les élèves libres de commencer le tracé de leur chaîne énergétique par n'importe quel élément, et de ne pas leur imposer de commencer par le réservoir initial (F1-7, 37-54). Elle ajoute que ce conseil est aussi valable pour les enseignants (F1-7, 44-47).

F1A insiste sur la nécessité de ne pas imposer une correction « préformatée », en particulier pour les chaînes un peu complexes, où plusieurs propositions peuvent être considérées comme correctes (F1-7, 190-207).

Elle précise les choix d'activités et les objectifs visés qu'elle associe à certaines chaînes en particulier. Par exemple, pour étudier le défi énergétique, elle trouve nécessaire de faire apparaître le réservoir initial sur la chaîne associée à la charge d'une voiture électrique (F1-7, 218-223). F1B partage cet avis et ajoute qu'il est nécessaire d'observer une progressivité dans les objectifs visés et dans la richesse des chaînes attendues (F1-7, 243-253). F1C évoque également le fait que, selon les apprentissages visés, certaines parties de chaînes soient plus ou moins détaillées (F1-7, 363-371).

Prise en compte de l'enseignant-stagiaire dans la correction

F1A annonce que la correction de la première chaîne (associée à un « smartphone », qui comportera en réalité deux chaînes : une pour la charge, la seconde pour la décharge) se fera « dans l'échange » (F1-7, 20-21).

Les Tableau 17 et Tableau 18 ci-après récapitulent l'ensemble des éléments à prendre en considération pour tracer les chaînes associées respectivement à un smartphone en utilisation et à un smartphone en charge, en mettant en évidence ceux qui ont été à la charge des enseignants-stagiaires (en bleu), ceux qui ont été à la charge des formateurs (en rose) et ceux qui n'ont pas été évoqués (en vert).

objet ou événement considéré	nature	forme à tracer	ce qu'il faut écrire sous ou sur la forme	ce qu'il faut écrire dans la forme
batterie	réservoir	rectangle	batterie	énergie chimique
« électricité » ¹	transfert	flèche	transfert électrique	NA
smartphone	convertisseur	cercle	smartphone	rien
« ça brille » ¹	transfert	flèche	transfert par rayonnement	NA
« ça chauffe » ¹	transfert	flèche	transfert thermique	NA
son	transfert	flèche	transfert mécanique	NA
vibreux				

¹Nous reprenons les termes que les formateurs ont choisi d'utiliser pendant la formation, voir §11.1

	proposition enseignant-stagiaire
	proposition formateur
	non explicité

Tableau 17: éléments pris en charge par les formateurs et par les enseignants-stagiaires dans le tracé de la chaîne associée au smartphone en utilisation

objet ou événement considéré	nature	forme à tracer	ce qu'il faut écrire sous ou sur la forme	ce qu'il faut écrire dans la forme
batterie	réservoir	rectangle	batterie	énergie chimique
« électricité » ¹	transfert	flèche	transfert électrique	NA
source d'énergie	réservoir	rectangle	(en débat)	(en débat)

¹Nous reprenons les termes que les formateurs ont choisi d'utiliser pendant la formation, voir §11.1

	proposition enseignant-stagiaire
	proposition formateur
	non explicité

Tableau 18: éléments pris en charge par les formateurs et par les enseignants-stagiaires dans le tracé de la chaîne associée au smartphone en charge

Ces tableaux indiquent que le tracé de la première chaîne résulte d'une collaboration entre F1A et un enseignant-stagiaire, tandis que celui de la seconde chaîne a été fait quasi-exclusivement par F1A. Comme pour la tâche précédente, on remarque que les événements associés aux transferts n'ont pas été évoqués, à l'exception de ceux en lien avec le transfert mécanique associé au smartphone en utilisation.

Les chaînes suivantes, dont il était prévu qu'elles soient décrites par les enseignants-stagiaires qui les avaient travaillées¹⁷⁰, ont finalement été projetées avant toute discussion. Les enseignants-stagiaires ont ensuite été invités à évoquer les différences entre ces chaînes « corrigées » et celles qu'ils avaient tracées par eux-mêmes.

¹⁷⁰ « alors / il y a un groupe où en fait on va faire ensemble / de manière euh voilà plus dans l'échange / et après pour les autres on vous laissera prendre la parole / décrire votre chaîne et nous on a fait une correction / qui permettra de gagner du temps en terme d'écriture » (F1A, F1-7, 20-22)

Dégradation de l'énergie

À plusieurs reprises, les formateurs évoquent les phénomènes dissipatifs et de leur absence de prise en compte dans les chaînes proposées :

« ouais tout le circuit électrique et le fameux effet Joule qui est lié euh voilà / à des / donc on voit que ça ça nécessite quand quand même // smartphone c'est pas un truc que je mettrais avant la troisième hein / » (F1A, F1-7, 120-122)

« vous voyez que tous nos systèmes ils sont / idéaux / hein là on est franchement dans cette approche que pour l'instant vous ne voyez aucune perte » (F1A, F1-7, 285-286)

La question de la représentation de ces phénomènes est posée par un enseignant-stagiaire ; les échanges qui en découlent sont reproduits ci-après (Texte 8).

Nous avons mis en gras les parties de l'échange qui correspondent à la représentation de l'effet Joule dans les fils électriques, c'est-à-dire à la prise en compte des frottements dans un circuit électrique. Il apparaît que, pour les formateurs (du moins, pour F1A et F1B), la représentation de ces « pertes » devrait être faite comme illustré par la Figure 148.

Les formateurs ne sont pas convaincus par leur propre proposition, et justifient ainsi leur non prise en compte de ces phénomènes de « perte » dans la représentation des situations par une chaîne énergétique. Dans le raisonnement qui aboutit à la représentation proposée, personne n'identifie le fil électrique à un convertisseur « recevant » un transfert électrique et « donnant » un transfert thermique, ce fil étant avant tout considéré comme le « support » de l'électricité, même dans le contexte de représentation des phénomènes dissipatifs.

S : j'avais une question par rapport à ce que tu viens de dire / sur d'autres phénomènes / quand on a un transfert / qui induit un phénomène de pertes / par exemple mon / mon système mécanique qui va convertir mon mouvement linéaire en mouvement rotationnel / euh mon fil électrique qui même si les pertes sont minimales il y en a / euh comment je le représente ? //

F1B : par une flèche qui part sur le côté /

S : mais une flèche qui part du transfert du coup ?

F1B : non

F1C : ah non non

F1A : de là par exemple l'alternateur il chauffe (*elle désigne le cercle « alternateur »*)

S : mais admettons par exemple j'ai un fil / le fil il est porteur de mon transfert |- d'électricité

F1C : alors **dans ces cas-là ton fil il est un convertisseur en lui-même** / tu tu changes de point de vue là tu t'intéresses

F1B : t'es obligé de mettre / |- t'es obligé de mettre

S : s'il est convertisseur pertes / et re de l'électricité qui sort c'est ça ?

F1B : t'es obligé de dessiner ton fil / de modéliser ton fil par un rond /

S : ouais mais du coup ça veut dire que **mon convertisseur va avoir une entrée transfert électrique et une sortie transfert électrique ?**

F1B : **ouais**

F1A : et donc **là tu comprends que moi en particulier je ne prends pas ça**

S : ouais non mais / c'est un peu dégueulasse quand même (rires) / c'est pour ça que ça me pose / et là pareil j'ai transfert mécanique transfert mécanique / pof j'ai de la chaleur qui sort //

F1A : c'est pour ça qu'on voit que euh / nos exemples // c'est un peu aussi la logique du programme ils nous le disent / avant de faire des trucs hyper complexes // voilà / faites /

S : ce n'est pas pour le faire en classe c'est juste la question intellectuellement

F1A : bah oui intellectuellement moi je ne me la suis pas posée au départ et j'ai lancé des grandes chaînes comme ça en me disant ouais ça passe // ben non ça ne passe pas parce que tu te contredis sur le modèle quoi / et à un moment c'est déjà / complexe même si tu bornes bien les élèves ils y arrivent / moi par exemple sur l'alternateur je ne sépare plus du tout / et **sur le problème qui serait lié à un effet Joule / l'effet Joule euh / tu vois je l'étudie d'une autre façon / et il y a des choses je ne viens pas intégrer les chaînes énergétiques**

Texte 8: échange relatif à la représentation des "pertes" sur les chaînes énergétiques (F1-7, 305-334)

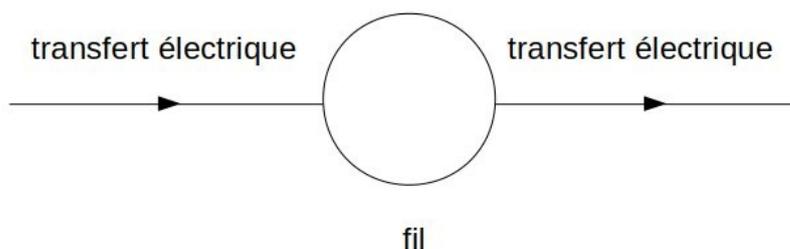


Figure 148: représentation des phénomènes dissipatifs dans un fil électrique selon F1A et F1B

Comparaison à la tâche prévue

Nous avons repéré trois objectifs dans le synopsis prévu (p.5) :

- « faire travailler la problématique du système Terre-charge » ;
- « représenter les conversions internes à un système » ;
- questionner « le réservoir initial » ;

et nous avons supposé que cette activité serait l'occasion, pour les enseignants-stagiaires, de s'approprier le modèle proposé et sa représentation par des chaînes énergétiques.

Le « système Terre-charge » n'a pas été évoqué. Les transformations de l'énergie (« conversions internes à un système ») ont été mentionnées par F1C, uniquement pour préciser que les chaînes ne permettent pas de les représenter. Le réservoir initial des chaînes a été discuté, en particulier concernant certaines centrales électriques et les appareils électriques branchés sur le secteur.

L'activité des enseignants-stagiaires a été beaucoup plus brève que prévu (durée totale : environ 36 minutes – 5 minutes de résolution + 31 minutes de correction ; pour rappel et pour comparaison, il était prévu 40 minutes de résolution et 20 minutes de discussion).

Le temps accordé au travail de groupe a été significativement réduit. Par ailleurs, les enseignants-stagiaires n'ont, pour la plupart, pas eu la possibilité d'exposer les chaînes qu'ils avaient conçues.

Tâche 7 : activités¹⁷¹ phares – analyse a priori

Tâches à destination des élèves

Les activités-élèves auxquelles font référence les formateurs se trouvent sur le site internet du GRC-F1¹⁷². Elles sont évoquées pendant la rencontre préparatoire sans être détaillées (F1A, RP-F1, 1159-1165).

171 Ici, nous utilisons le mot « activité » dans le sens qui lui ait attribué habituellement dans un contexte scolaire. Nous l'utiliserons à chaque fois que nous parlerons de tâches à destination des élèves, en cohérence avec le vocabulaire utilisé par les formateurs.

172 Groupe de Recherche Collaboratif en lien avec la formation F1 (déjà mentionné au chapitre 16, voir §16.1). Nous avons choisi de ne pas indiquer le nom de ce groupe, d'une part pour préserver l'anonymat des formateurs, et d'autre part parce que cette indication n'apporterait pas d'éléments significatifs à notre travail.

La seule activité mentionnée par F1A qui a été détaillée est la « battle schéma électrique / chaîne énergétique » : il s'agit de faire représenter un « circuit électrique » en dérivation comportant deux lampes et une pile par un schéma électrique et par une chaîne énergétique (RP-F1, 927-936), de façon à mettre en évidence les différences entre ces deux types de représentation.

C'est une activité de modélisation, dans laquelle l'élève part d'une situation réelle (monde des objets et événements), et doit tracer deux schémas qui, eux, appartiennent au monde des théories et des modèles (rattachés à la théorie électrocinétique pour un, à la théorie énergétique pour l'autre).

Descriptif

Les enseignants-stagiaires utilisent des tablettes pour découvrir les activités (à destination d'élèves) proposées sur un site Internet pour l'enseignement de l'énergie au collège (RP-F1, 1014-1022). Ils peuvent se mettre en groupe pour travailler sur un même niveau scolaire, ou travailler seuls (RP-F1, 1229-1230).

Objectif

Les objectifs ne sont pas annoncés pendant la rencontre préparatoire et ne figurent pas dans le synopsis prévu, mais on peut supposer qu'il s'agit, pour les enseignants-stagiaires, d'une part de prendre en main le site internet (RP-F1, 909-912, 1005, 1009, 1016), et d'autre part de trouver des idées d'activités à faire faire à leurs élèves mettant en jeu le modèle scientifique scolaire de l'énergie proposé par les formateurs (RP-F1, 1214-1220).

Remarques liées à l'organisation de la tâche

Cette tâche se fait autour de l'utilisation d'une carte dynamique présentant des choix de progression pour l'enseignement de l'énergie au collège (RP-F1, 984-994). Bien qu'aucune durée indicative ne figure dans le synopsis, pendant la rencontre préparatoire, il a été convenu qu'elle dure environ une heure (RP-F1, 1083-1084 ; 1141-1147).

Tâche 7a : « battle schéma électrique / chaîne énergétique » – analyse effective

Déroulement de la tâche

Après avoir exposé leurs propositions de progression pour le collège et le lycée, les formateurs présentent une activité à destination d'élèves de fin de 5^e ou de 4^e, qui, au sein de la progression qu'ils proposent, succède à une partie relative à l'électricité et à l'intensité électrique (F1-10, 13-19).

Nous reproduisons ci-après (Figure 149) la diapositive projetée, sur laquelle figure la consigne donnée aux enseignants-stagiaires, ainsi que le texte distribué aux enseignants-stagiaires (Figure 150).

Activité 1: comprendre les limites des deux modèles

Activité 2 : **Battle** : schéma électrique / chaîne énergétique.

- Faire les chaînes énergétiques correspondantes.

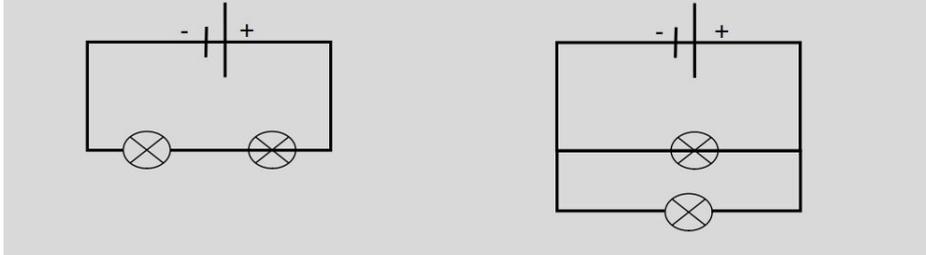


Figure 149: consigne projetée pour l'activité-élèves "battle: schéma électrique / chaîne énergétique"

Activité 1 : comprendre les limites des deux modèles : schéma électrique vs chaîne énergétique.

ACTIVITE 2 : Battle : schéma électrique / chaîne énergétique.

- Faire les chaînes énergétiques correspondantes.

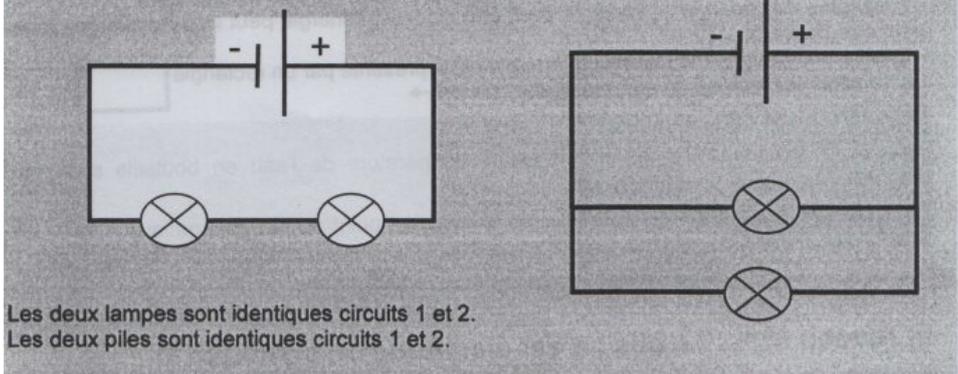


Figure 150: "battle: schéma électrique / chaîne énergétique" - énoncé distribué aux enseignants-stagiaires

Sans temps de réflexion préalable, il est demandé à un enseignant-stagiaire de se porter volontaire pour tracer les chaînes au tableau (F1A, F1-10, 11-12 ; F1A, F1-10, 24-26). Une enseignante-stagiaire trace les deux chaînes énergétiques demandées au tableau (Figure 151, Figure 152), puis retourne à sa place (F1-10, 31-46).

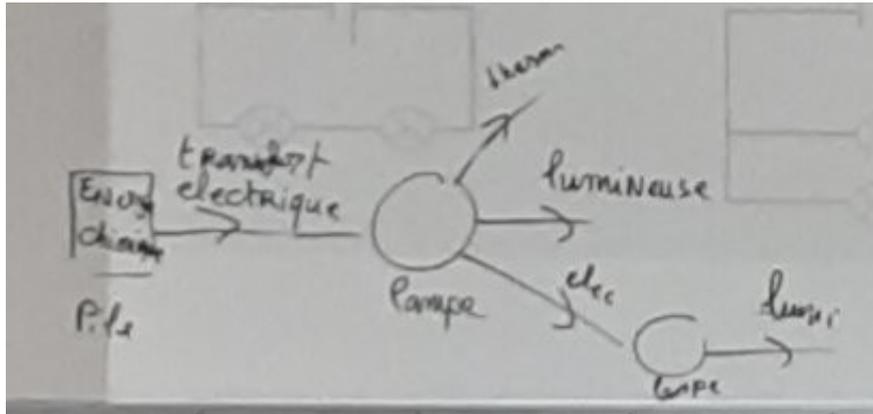


Figure 151: schéma proposé pour la représentation du circuit électrique en série

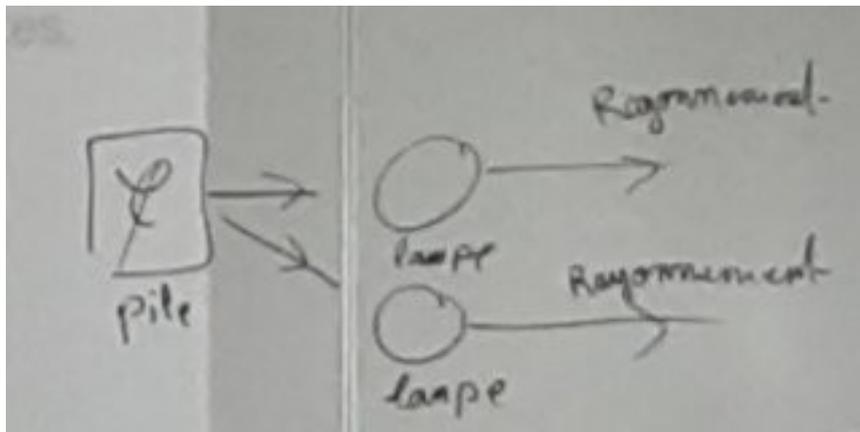


Figure 152: schéma proposé pour la représentation du circuit électrique avec dérivation

Les enseignants-stagiaires sont invités à commenter les deux représentations proposées (F1-10, 47 : « qu'est-ce que vous en pensez ? »).

Un enseignant-stagiaire suggère de modéliser les deux lampes par un seul convertisseur (F1-10, 49-56). F1C lui répond en sous-entendant que représenter un seul convertisseur ne permettrait pas de mettre en évidence le fait qu'il y ait deux transferts, sans le dire explicitement :

« oui mais est-ce qu'il y a un seul transfert ou est-ce qu'il y en a deux ? » (F1A, F1-10, 57)

La chaîne associée à un circuit qui comporte deux lampes en série est jugée « perturbante » par son autrice et par les autres stagiaires (F1-10, 38 ; 64 ; 65), puis « identifié[e] comme fau[sse] » par F1A (F1-10, 70-71). Pour autant, les raisons menant à considérer cette réponse comme fautive ne sont pas données, et aucune correction n'est proposée explicitement. Les extraits reproduits ci-après

laissent supposer que la réponse correcte souhaitée est une représentation identique pour les deux circuits, similaire à celle de la Figure 152 :

« F1C : cette année ça c'est super bien passé / mais cette année

F1A : ouais cette année / plus vous faites / moi là il y a une classe où j'ai 100 % des élèves / qui ont fait juste (*elle désigne la Figure 152*) // celui-là

F1C : le même schéma pour les deux / » (F1-10, 83-86)

« voilà / et donc après leur faire revenir sur / le fait que ben / votre chaîne énergétique / on a une même chaîne pour deux montages différents » (F1C, F1-10, 106-107)

F1A et F1C projettent ensuite des copies d'élèves qu'elles commentent : sur la première (Figure 153), F1C souligne la représentation d'« un premier transfert qui se divise en deux // comme pour faire la dérivation » (F1-10, 92-93) ; sur la seconde (Figure 154), F1C met en évidence la représentation multiple de la pile (« on remet la pile de l'autre côté // pour le circuit », F1-10, 96-97).

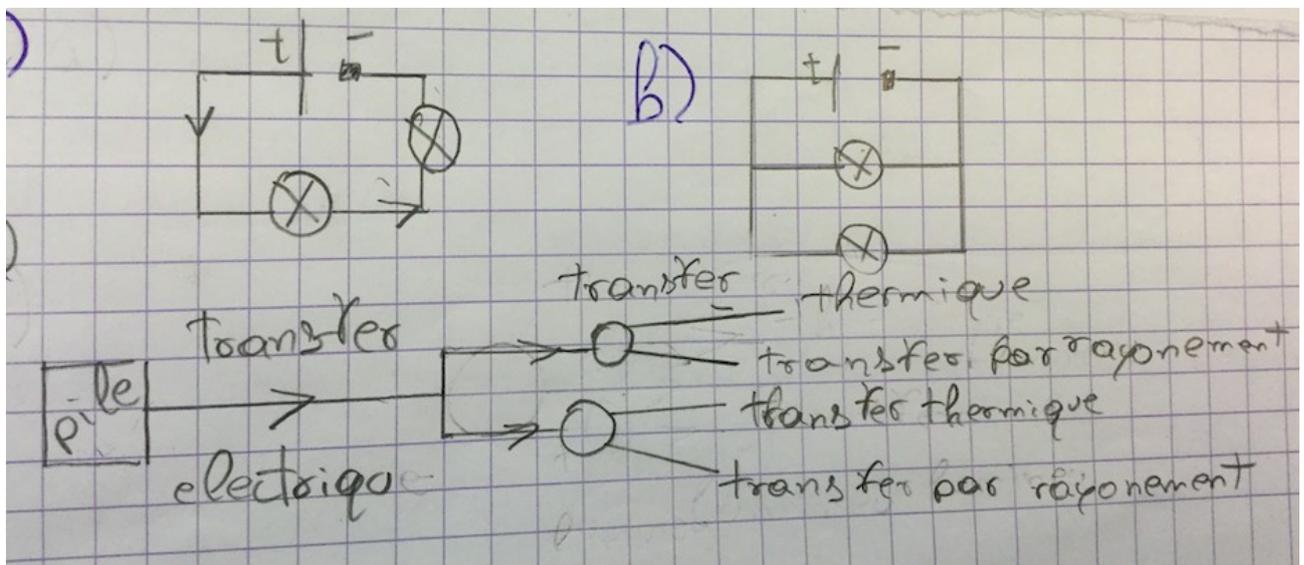


Figure 153: exemple (1) de copie d'élève - battle schéma électrique / chaîne énergétique

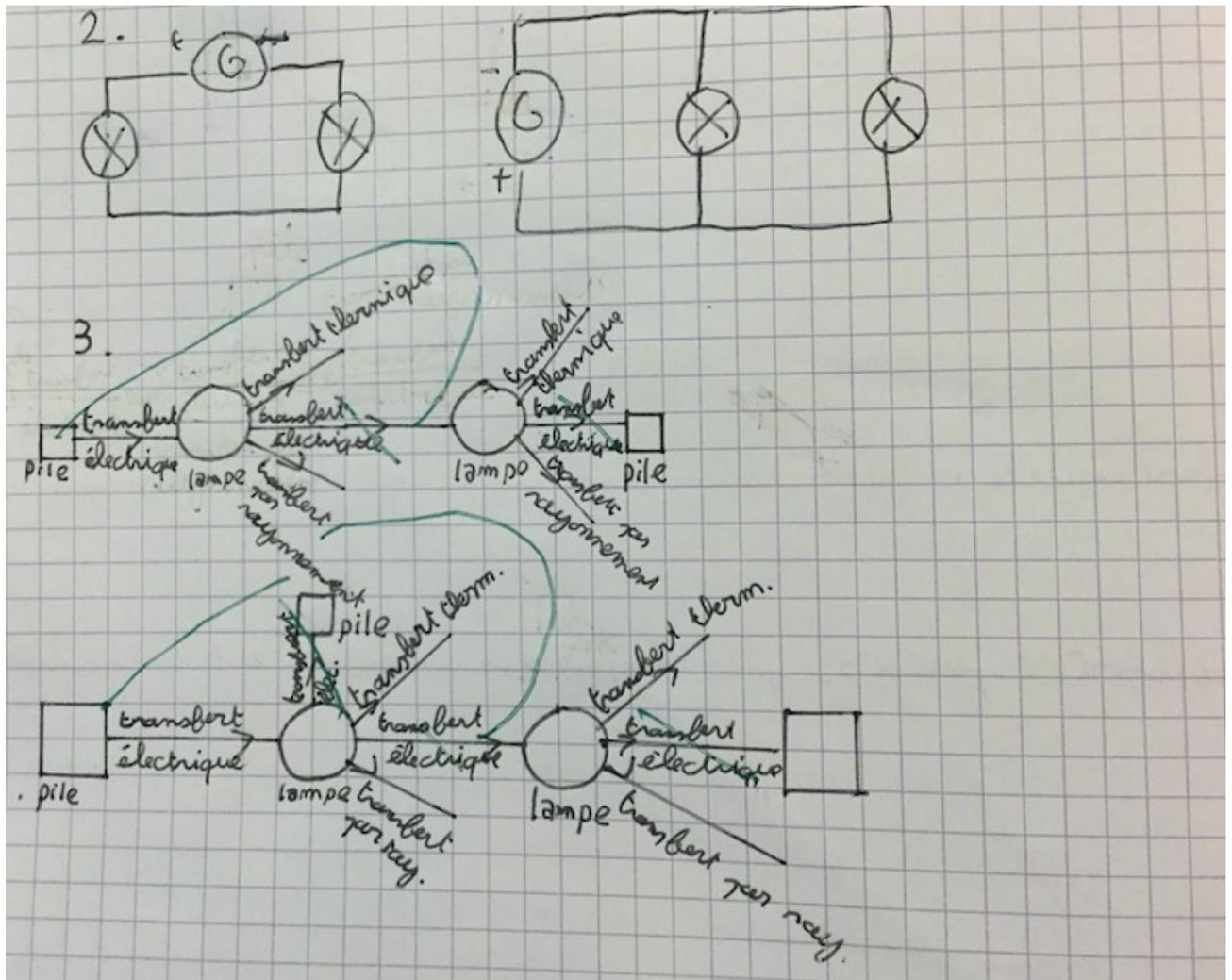


Figure 154: exemple (2) de copie d'élève - battle schéma électrique / chaîne énergétique

F1C et F1A expliquent ensuite en quoi les représentations sous forme de circuit électrique ou sous forme de chaîne énergétique ne sont pas équivalentes, mais permettent d'expliquer des événements différents (F1-10, 106-124). Comme le montrent les extraits ci-après, l'accent est alors mis sur la séparation entre énergie et intensité :

« ce que montre quand même ce schéma c'est que / je vais dire un gros mot mais là / ce qu'on appelle la discrimination conceptuelle // **séparer énergie et intensité c'est quand même un combat de tous les jours hein** // parce qu'en fait les chaînes que vous voyez là c'est les // c'est lorsqu'on raconte une histoire / c'est vraiment du raisonnement / la chaîne énergétique comme je raconte une histoire sur ce qui se passe // et inévitablement même nous tous / et les élèves font pareil c'est-à-dire qu'on raconte une histoire on va raconter l'histoire du courant électrique / » (F1B, F1-10, 130-135)

« on vient poser des choses / moi je suis fière quand mes élèves de quatrième ils arrivent à / à comprendre le / bah I c'est pas E // parce que quand j'explique des trucs avec I // je ne peux pas expliquer des trucs avec E / et que c'est pas pareil // bon ben tant pis ils ont que ça / I c'est pas E / I ça explique un truc / E ça explique un autre truc // c'est tout ce que je vise // mais c'est quand même bien je trouve » (F1A, F1-10, 155-159)

Les formateurs répondent à la question d'un enseignant-stagiaire relative au lien entre la représentation par la chaîne énergétique d'un circuit à deux lampes et l'usure de la pile (F1-10, 160-173), avant de passer à la présentation de l'activité-élèves suivante.

Analyse de la tâche

Dans cette tâche, l'objectif annoncé est de comparer deux types de modélisation pour deux dispositifs : deux montages électriques comportant une pile et deux lampes, pour l'un montées en série, pour l'autre montées en dérivation. Les deux modèles auxquels font implicitement référence les formateurs sont le modèle *électrocinétique*, où les montages expérimentaux sont représentés par des circuits électriques, et le modèle *énergétique*, où les montages expérimentaux sont représentés par des chaînes énergétiques.

Ici, les formateurs réduisent à plusieurs reprises le modèle à sa représentation :

- il s'agit d'avoir une « compréhension fine des chaînes » et non du modèle (F1-10, 100-101) ;
- il y a une ambiguïté dans le titre de l'activité (« comprendre les limites des deux modèles » suivi de « battle : schéma électrique / chaîne énergétique », Figure 149) ;
- enfin, cette tâche sous-entend que comparer les modèles et leur utilisation revient à comparer les représentations qui leur sont associées (voir en particulier : F1-10, 115-123).

Lorsqu'ils évoquent les modèles (de façon plus large, sans identification à leurs représentations), on remarque que le modèle électrocinétique est réduit à un de ses éléments : l'intensité du courant électrique (F1-10, 74-75 ; 156-159 ; aucune mention de la tension électrique).

Les grandeurs physiques *énergie* et *puissance* n'apparaissent pas comme des éléments appartenant aux deux modèles ou situés à la frontière entre les deux modèles. La grandeur physique *énergie* est même présentée comme inconciliable avec l'intensité du courant électrique :

« séparer énergie et intensité c'est quand même un combat de tous les jours hein » (F1B, F1-10, 131-132)

« on vient poser des choses / moi je suis fière quand mes élèves de quatrième ils arrivent à / à comprendre le / bah I c'est pas E // parce que quand j'explique des trucs avec I // je ne peux pas expliquer des trucs avec E / et que c'est pas pareil // bon ben tant pis ils ont que ça / I c'est pas E / I ça explique un truc / E ça explique un autre truc // c'est tout ce que je vise // mais c'est quand même bien je trouve » (F1A, F1-10, 155-159)

Pour analyser la tâche proposée – en tant que telle – dans le cadre de la modélisation, nous avons construit la Figure 155, qui met en relation les éléments qui entrent en jeu dans la résolution de cette tâche.

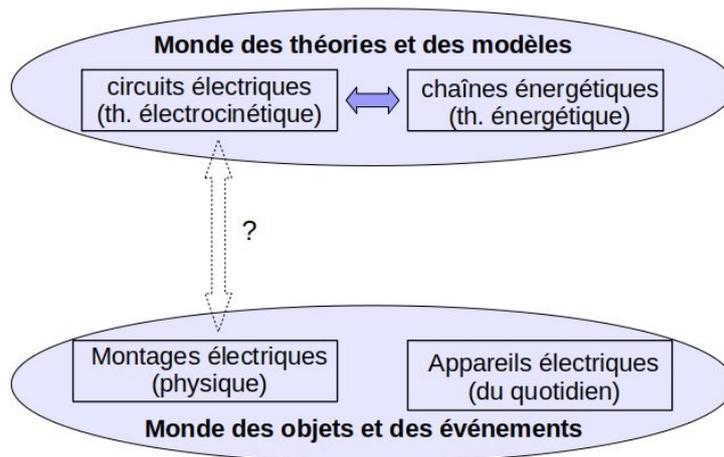


Figure 155: modélisation dans la tâche "battle: schéma électrique / chaîne énergétique"

L'essentiel de l'activité attendue consiste à un passage entre la théorie électrocinétique et la théorie des chaînes énergétiques : dans la consigne, il est demandé de trouver une représentation appartenant au registre des modèles (la chaîne énergétique, appartenant au modèle scientifique scolaire de l'énergie, lié à la théorie énergétique) à partir d'une représentation qui appartient aussi au registre des modèles, mais qui est en lien avec une autre théorie (la théorie électrocinétique). Les montages électriques ne sont pas évoqués, mais peuvent être présents en filigrane, puisque la représentation sous forme de circuit électrique est superposable au montage réel (F1-10, 92-97). Aucune allusion n'est faite aux appareils électriques de la vie quotidienne.

Cette tâche ne peut donc pas être considérée à part entière comme une tâche de modélisation, puisqu'elle ne met pas en rapport le monde des objets et des événements avec le monde des théories et des modèles¹⁷³.

Utilisation de la chaîne énergétique

Dans cette tâche, F1C explique une utilité de la chaîne énergétique de la façon suivante :

« votre chaîne énergétique / on a une même chaîne pour deux montages différents donc ça veut dire que la chaîne elle ne va pas vraiment vous apporter grand-chose sur la façon donc sont branchés vos dipôles en fait // par contre **elle vous explique qu'une pile elle s'use deux fois plus vite si elle a deux lampes** » (F1C, F1-10, 106-109)

Dans un premier temps, ce discours n'est pas détaillé, et peut être interprété de la façon suivante :

Une chaîne énergétique représentant un montage composé d'une pile et d'une lampe ne comporte qu'un convertisseur relié au réservoir initial, tandis qu'une chaîne énergétique représentant un montage composé d'une pile et de deux lampes (quel que soit le type de

¹⁷³ Soulignons cependant que la consigne donnée aux élèves qui ont produit les chaînes de la Figure 153 et de la Figure 154 était probablement différente de celle qui a été donnée aux enseignants-stagiaires : au-dessus des chaînes énergétiques ont été tracés des circuits électriques. Il est possible que la consigne donnée ait fait référence à un montage réel à représenter de deux manières différentes (tâche de modélisation).

branchement) comporte deux convertisseurs reliés au réservoir initial. Ces chaînes montrent que la pile s'use deux fois plus vite si elle est branchée à deux lampes qu'à une seule lampe.

Dans le cas d'un circuit en série, une analyse électrocinétique de la situation montre que cette interprétation est erronée. En effet, la résistance équivalente totale du circuit comportant deux lampes en série est plus importante que celle du circuit qui n'en comporte qu'une. De ce fait, l'intensité du courant dans le circuit à deux lampes est inférieure à l'intensité du courant dans le circuit à une lampe, et la puissance de la pile dans le circuit à deux lampes est inférieure à sa puissance dans le circuit à une lampe.

À la fin de la correction, un stagiaire prend la parole pour soulever cette question. Nous reproduisons ci-après l'échange qu'il a eu avec F1A et F1C :

« S : je fais peut-être une erreur mais le circuit en série / les deux lampes // t'as dit là on voit qu'il y a deux lampes la pile s'use deux fois plus vite

F1C : non / quand tu as deux lampes / quand tu as une lampe ou deux lampes /

S : oui mais en série ou en dérivation ce n'est pas pareil

F1C : que ce soit série ou dérivation en fait

F1A : ah oui oui on le voit bien là

F1C : c'est juste que tu as un transfert ou que tu as deux transferts

F1A : la première étape ils ont fait le circuit avec une lampe

F1C : oui ils ont fait le circuit avec une lampe

F1A : avec une lampe

F1C : c'est-à-dire que là / tu consommes deux / si les transferts ont la même valeur //

F1A : sur l'activité exacte il y a marqué / formalise avec le modèle énergétique une explication sur la pile s'use plus vite dans un circuit en série où il y a deux lampes par rapport à une lampe // mais ce n'est pas la comparaison dérivation série

F1C : non non

S : OK » (F1-10, 160-175)

Cet échange va dans le sens de notre interprétation, qui est confirmée en particulier par la phrase que nous avons mise en relief – mais qui n'est pas correcte du point de vue de la physique.

Tâche 7b : « défi : de l'énergie en bouteille » – analyse effective

Ici, l'objectif pour les enseignants-stagiaires est double. Il s'agit non seulement de découvrir une activité-élève qu'ils peuvent mettre en place dans leurs classes, mais aussi de parvenir à tracer une chaîne énergétique qui ne comporte pas de convertisseur, ce qui n'est *a priori* pas évident (F1-11, 101-120).

Déroulement de la tâche

La consigne de la tâche donnée aux élèves en fin de séquence d'enseignement sur l'énergie est projetée (Figure 156) ; les enseignants-stagiaires disposent également d'un document écrit où figure cette consigne (Figure 157).

Défi pour terminer la séquence :

Propose 3 expériences pour augmenter la température de l'eau en bouteille sans utiliser d'appareil électrique ou eau chaude.

Pour chaque expérience décris ce qui se passe d'un point de vue énergétique à l'aide d'une chaîne énergétique.

Figure 156: consigne projetée pour l'activité-élèves "défi: de l'énergie en bouteille"

a) Niveau 6^{ème} : De l'énergie en bouteille
Les élèves ont en fin de séquence les connaissances suivantes :

- Vocabulaire : Réservoir ; Formes d'énergie = énergie thermique, chimique, mécanique ; Transferts= transfert thermique, transfert mécanique, transfert par rayonnement.
- Propriétés de l'énergie : - l'énergie peut être stockée, l'énergie peut être transférée, l'énergie peut être convertie.
- Chaîne énergétique : le réservoir d'énergie est représenté par un rectangle  Le transfert est représenté par une flèche 

ACTIVITE finale de la séquence :
Propose 3 expériences pour augmenter la température de l'eau en bouteille sans utiliser d'appareil électrique ou eau chaude.
Pour chaque expérience décris ce qui se passe d'un point de vue énergétique à l'aide d'une chaîne énergétique.

Figure 157: "de l'énergie en bouteille" - énoncé distribué aux enseignants-stagiaires

F1A rappelle qu'en classe de sixième, elle ne mentionne rien qui soit en lien avec l'électricité (F1-11, 6-8), puis elle présente aux enseignants-stagiaires une bouteille en verre contenant de l'eau. Elle affiche une diapositive présentant le « modèle pour l'énergie à la fin de la 6^e » (Figure 158) et rappelle qu'à ce niveau d'enseignement, les élèves ne connaissent pas les convertisseurs (F1-11, 25). On peut toutefois remarquer que le document distribué aux enseignants-stagiaires mentionne, parmi les propriétés de l'énergie « niveau 6^e », que « l'énergie peut être convertie » (Figure 157).

Modèle pour l'énergie à la fin de la 6^{ème}

Vocabulaire :

- Réservoir,
- Transferts : thermique, mécanique, par rayonnement
- Formes d'énergie : énergie thermique, chimique, mécanique

Propriétés :

- l'énergie peut être stockée
- l'énergie peut être transférée
- l'énergie ne se crée pas et ne disparaît pas

La chaîne énergétique :



Figure 158: "modèle pour l'énergie à la fin de la 6^e"

F1A situe cette activité-élèves dans la progression, en précisant quelles tâches mettant en jeu la bouteille ont déjà été effectuées par les élèves dans le but de leur « faire voir que cette bouteille c'est une réserve d'énergie thermique » (F1A, F1-11, 15).

Elle projette à nouveau la consigne du « défi » (Figure 156), en précisant les règles à respecter pour que ce défi entre élèves soit équitable (F1-11, 29-30 : même quantité d'eau, même température initiale).

Elle demande alors aux enseignants-stagiaires quelles expériences ils proposent afin d'augmenter la température de l'eau contenue dans la bouteille. Ils proposent :

- de réchauffer la bouteille entre ses mains (réponse validée par F1A, F1-11, 34-36) ;
- de la placer au Soleil (réponse validée par F1A, F1-11, 37-38) ;
- d'utiliser un radiateur (réponse refusée par F1A, qui « ne veut pas ces appareils annexes (...) pas de radiateur (...) pas de plaque électrique de micro ondes (...) pas de flammes », F1-11, 39-42) ;
- de secouer la bouteille (réponse validée par F1A, 44-46).

F1 décrit ensuite la manière dont ses élèves mettent en œuvre cette expérience (de quelle manière, pendant quelle durée), et précise que secouer la bouteille permet de faire monter la température de l'eau de la bouteille de « 4 [à] 5 degrés » (F1-11, 52).

Un enseignant-stagiaire demande de quelle manière cette séance est évaluée ; F1A répond que la séance n'est pas évaluée, et qu'elle félicite le groupe dont la bouteille d'eau a la température la plus élevée en fin d'expérience (F1-11, 77-87).

Les enseignants-stagiaires sont amenés à tracer la chaîne énergétique associée à la bouteille secouée (F1-11, 70-71). La principale difficulté qu'ils rencontrent, selon les formateurs, est liée au fait que la chaîne attendue ne comporte pas de convertisseur (F1-11, 101-120). Une autre difficulté soulevée concerne le fonctionnement énergétique du muscle (F1-11, 123-126).

La chaîne est corrigée au tableau par F1A, sous la dictée d'un enseignant-stagiaire (F1-11, 137-149). La Figure 159 est une représentation de la chaîne obtenue.

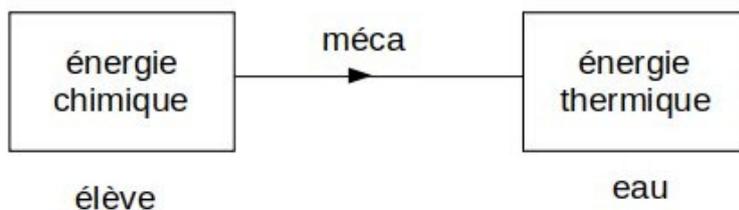


Figure 159: représentation de la chaîne énergétique associée à une bouteille d'eau secouée

F1A commente cette chaîne, en précisant que les élèves ne proposent que rarement « énergie chimique ». Elle dit également qu'il lui ait arrivé de voir des élèves tracer des chaînes comportant une flèche de plus, sur laquelle est écrit « énergie thermique » : les élèves justifient cela en disant « on chauffe ». Sans dire clairement ce qu'elle pense de cette représentations, F1A ajoute cette flèche au tableau, ce qui donne une chaîne semblable à celle que nous avons reproduite à la Figure 160.

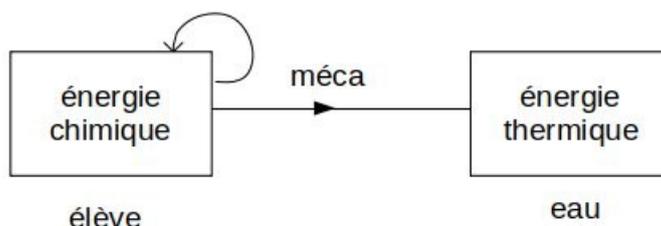


Figure 160: représentation de la chaîne énergétique associée à une bouteille d'eau secouée qui prend en compte le fait que l'élève "chauffe"

F1A et F1C évoquent ensuite les erreurs habituelles des élèves :

- le fait qu'ils croient que disposer un pull ou une couverture autour de la bouteille puisse la chauffer ou que la mettre dans un sac de congélation puisse la refroidir (F1-11, 169-175) ;
- le fait qu'ils tracent des chaînes énergétiques en dessinant les objets plutôt qu'en les représentant par des symboles (F1-11, 182-190) ;
- la difficulté à concevoir que l'énergie puisse « rentrer » ou « sortir » d'un même corps, lorsque l'eau chauffe puis se refroidit (F1-11, 194-205) ;
- le fait que la pièce ne soit pas représentée dans la chaîne (F1-11, 206-211).

Analyse de la tâche

Dans un premier temps, nous analysons la question qui a été posée aux enseignants-stagiaires :

« propose 3 expériences pour augmenter la température de l'eau en bouteille sans utiliser d'appareil électrique ou d'eau chaude » (Figure 156)

En dehors de la référence à la grandeur physique « température », cet énoncé appartient au monde des objets et des événements. Le fait que la température de l'eau soit mentionnée (et non son

énergie) nous indique que cette question ne fait pas directement référence au modèle scientifique scolaire de l'énergie : elle est plus concrète que théorique. La réponse attendue est une expérience (monde des objets et événements). Pour effectuer cette tâche, il n'est pas demandé explicitement de faire appel à un raisonnement en particulier ou de faire appel à une théorie spécifique.

La deuxième question (Figure 156) est une question de modélisation explicite, puisqu'elle demande d'articuler l'expérience proposée (« ce qui se passe », monde des objets et événements) avec une chaîne énergétique (monde des objets et des événements).

Ce n'est qu'une fois l'expérience proposée (ou réalisée) qu'elle doit être justifiée par une chaîne énergétique. La modélisation est présentée comme une activité qui permet de justifier le bon fonctionnement de l'expérience et non comme une activité qui permet l'élaboration de l'expérience.

Trois « bonnes » réponses sont attendues. Il s'agit d'élever la température de l'eau :

- en tenant la bouteille dans ses mains ;
- en exposant la bouteille au Soleil ;
- en secouant la bouteille.

Chacune de ces réponses met en jeu en particulier un type de transferts connus des élèves (respectivement : conduction thermique, rayonnement, travail mécanique).

La consigne écrite précise que l'utilisation d'appareils électriques ou d'eau chaude n'est pas autorisée. Suite à la proposition par un enseignant-stagiaire d'utiliser un radiateur (chauffage au gaz), F1A élargit la liste des objets non autorisés, sans justification :

« alors quand on me propose d'autres objets / je dis qu'on ne veut pas ces appareils annexes donc / je dis franchement je veux pas de radiateur je ne veux pas de plaque électrique de micro ondes / je ne veux pas de flammes » (F1A, F1-10, 40-42)

Tout se passe comme si un transfert par convection dû au contact de la bouteille avec les mains d'un élève n'était pas équivalent à un transfert par convection dû au contact de la bouteille avec un grand volume d'eau chaude ou un radiateur, ou comme si le fait de secouer la bouteille avec ses mains n'était pas équivalent au fait de la secouer en utilisant un moteur.

Nous supposons que, puisque le modèle scientifique scolaire de l'énergie que les élèves de sixième utilisent ne mentionne que des réservoirs d'énergie, il faut restreindre leurs choix d'expériences possibles en ne les laissant utiliser que des objets assimilables à des réservoirs d'énergie, parmi lesquels se trouvent, selon les formateurs, le Soleil et le corps humain.

Dans les représentations attendues, le réservoir initial des chaînes énergétiques associées pour l'une à la main *secouant* la bouteille, pour l'autre à la main *entourant* la bouteille, comportent des réservoirs initial et final identiques, mais ne comportent pas le même type de transfert. Ici, la définition du réservoir initial pose question : s'agit-il de l'élève ? de la main de l'élève ? du bras de l'élève ? d'un muscle de l'élève ? Cette question est soulevée pendant la discussion, mais n'est pas traitée :

« élève (*elle trace un rectangle en dessous duquel elle écrit « élève »*) / alors là je vous le dis eux ils mettent bras / hein / mais on s'en fout de ça » (F1A, F1-11, 141-142)

Ici, la bouteille et l'eau qu'elle contient ont été considérées comme un seul et unique système. Cependant, négliger (ou ne pas mentionner) les interactions entre contenant et contenu pose question. En effet, en remplaçant la bouteille contenant un peu d'eau par une bouteille pleine ou par un objet solide, l'impact de l'agitation de l'objet sur la température de cet objet aurait été bien moindre. De la même manière, la conduction de la bouteille aurait pu être prise en compte dans l'analyse énergétique associée à l'eau chauffée par conduction thermique.

Pendant la présentation de cette activité-élèves, F1A propose un retour d'expérience sur ses propres élèves. Dans ce contexte, elle évoque à plusieurs reprises le fait que ses élèves, pour gagner le défi, font un gros effort physique :

« on secoue on est là des petits sixièmes ils sortent rouges » ; 165 : « ils ont fini tous rouges » (F1A, F1-11, 52-53)

Cela soulève la question de l'élève qui « chauffe » (F1-11, 162) : comment ce phénomène, vécu par les élèves pendant l'expérimentation, peut-il être expliqué ? comment est-il possible de le représenter sur la chaîne énergétique associée à l'expérience pendant laquelle la température de l'eau augmente par agitation de la bouteille ? F1A présente la proposition de quelques rares élèves (F1-11, 159-161), qui consiste à ajouter une flèche de rétroaction qui part du réservoir initial (l'élève / le bras) et s'y dirige (Figure 160). F1A dit être perturbée par cette flèche mais ne la juge ni correcte, ni erronée :

« ça les perturbe alors je leur dis moi aussi ça me perturbe qu'il y ait un truc qui remonte / mais bon j'ai voulu / j'ai compris ce qu'ils voulaient dire / je n'ai pas dit que c'était faux » (F1A, F1-11, 166-168)

Elle ne propose pas de représentation alternative. Personne ne mentionne le fait que, lorsque les élèves ressentent qu'ils « chauffent », cela signifie *a priori* qu'ils effectuent un transfert d'énergie vers l'extérieur – autrement dit, qu'ils libèrent de l'énergie.

Enfin, il nous semble intéressant d'évoquer que le fait que l'élève « soit » le réservoir initial d'énergie pourrait avoir un impact quand à sa conception de ce qu'est l'énergie. Selon nous, il est possible que l'élève, fatigué d'avoir longuement secoué la bouteille, considère qu'il n'a plus d'énergie – c'est-à-dire : que lui, en tant que réservoir d'énergie chimique, est « vide » – et confonde alors le sens commun du terme « énergie » avec son acception scientifique.

Comme nous venons de le mettre en évidence, cette tâche et sa résolution par les enseignants-stagiaires pose un certain nombre de questions, qui, pour la plupart, n'ont soit pas été évoquées, soit pas été traitées pendant la formation. Elles sont liées aux limites du modèle scientifique scolaire de l'énergie utilisé et aux limites de sa représentation par les chaînes énergétiques proposées par les formateurs. Selon nous, une représentation de cette situation par une chaîne *avant-après* pourrait mettre en évidence le « déplacement » de l'énergie entre le début et la fin de l'expérience (modification d'énergie), sans qu'il soit nécessaire d'expliquer le mécanisme y ayant abouti.

Utilisation de la chaîne énergétique

Pour résoudre cette tâche, il aurait été possible de tracer une chaîne énergétique *avant* de proposer une expérience permettant de relever le défi proposé. Cette chaîne énergétique aurait fait

partie intégrante d'une activité de modélisation, comme nous le mettons en évidence sur la Figure 161.

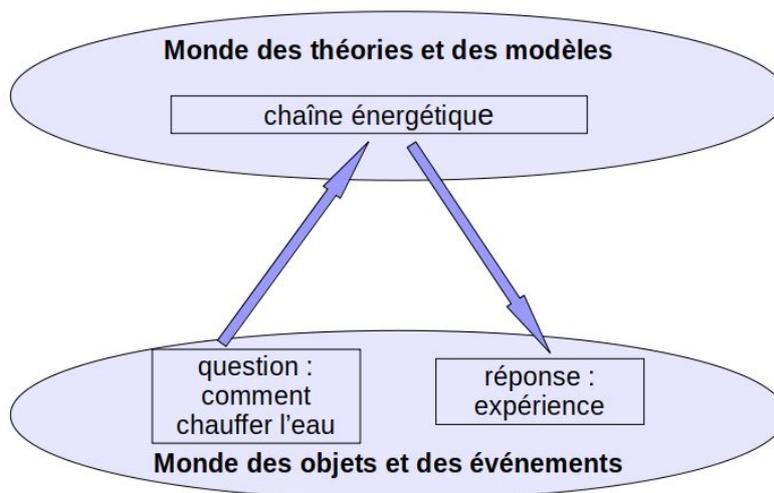


Figure 161: utilisation de la chaîne énergétique pour répondre au défi proposé

Cependant, dans cette tâche, les formateurs présentent la chaîne comme un élément permettant de *justifier* l'efficacité de l'expérience proposée pour répondre à la question posée : après que les stagiaires ont proposé de secouer la bouteille, on leur demande de le « justifier par une chaîne énergétique » (F1-11, 92).

La chaîne arrive après l'expérience, pour donner une explication scientifique au résultat de cette expérience :

« moi ce qui m'intéresse c'est que quelque part la validation / elle n'est là que une fois que // je ne suis pas prof de magie // vous m'expliquez le phénomène énergétique // donc la validation totale quand même je leur dis très // c'est quand ils font la chaîne » (F1A, F1-11, 88-90)

L'activité de modélisation indispensable à l'élaboration de l'expérience, qui pourrait mettre en jeu des chaînes énergétiques, n'a pas été discutée pendant la formation.

Tâche 7c : « la pile s'use » – analyse effective

Déroulement

L'énoncé de l'activité-élèves « la pile s'use » est projeté (diapo 101, reproduite à la Figure 162).

5- Exemples d'activités en 5^{ème} : « La pile s'use »

Activité 1 : La panne : Qu'est-ce qui s'use dans la pile ? Les idées des élèves

Activité 2 : La première pile

Activité 3 : Une pile, c'est électrique ou chimique ?

- Réalise une pile aluminium-air et connecte une del.
- Faire la chaîne énergétique qui décrit ce qui se passe.
- Expliquer avec le modèle énergétique « la pile s'use ».

Figure 162: diapo 101 (consignes "la pile s'use")

F1A présente aux enseignants-stagiaires des dels basse-tension, « les seules [dels] qui permettent de faire débiter des piles / au collègue » (F1A, F1-12, 10-11). Elle situe l'activité-élèves qu'elle va présenter dans la progression (elle suit un texte sur la pile Volta, la réalisation d'une pile Volta, et la réalisation d'une pile Daniell). D'après F1A, les piles réalisées avec les élèves ne permettent pas de mettre en évidence l'usure de la pile, c'est-à-dire le fait que les réactifs sont consommés pendant que la pile débite :

« ce qui m'embêtait avec ces piles / c'est qu'on ne voit pas la matière se transformer // il y a tellement une plaque de / grosse / de fer que à la fin // ça ne sert à rien de la peser elle fera la même masse / tout ça // donc il s'est / je me suis mise à chercher une pile où je voulais voir que la matière se transforme » (F1A, F1-12, 19-22)

Les enseignants-stagiaires disposent de l'énoncé reproduit à la Figure 163, où se trouve le protocole de réalisation d'une pile aluminium-air.

b) Niveau 5^{ème} : La pile : c'est électrique ou chimique ?

Activité 1 : Etude d'une panne. Conceptions initiales des élèves sur « la pile s'use ».

Activité 2 : Etude de la première pile. (Pile Volta faite au bureau)

ACTIVITE 3 :

- Réalise la pile aluminium-air selon le protocole suivant.

Le temps de l'expérience : la pile aluminium-air

Voici un protocole qui permet de réaliser une pile à partir de papier d'aluminium et de « charbon actif » qui sert à contenir de l'air au niveau de sa surface.

- Verser de l'eau salée saturée dans un récipient.
- Ajouter 1 ou 2 cuillères de « charbon actif » et mélanger. Laisser imbiber 2 min.
- Poser une feuille d'aluminium dans la coupelle.
- Mettre au-dessus le rond en plastique blanc.
- Tremper un petit morceau de papier sopalin dans l'eau salée et tapisser le fond du rond en plastique avec ce sopalin.
- Verser le charbon actif sur le sopalin.
- Faire un circuit avec une DEL basse tension. Le pôle + est au niveau du charbon et le pôle - est au niveau de l'aluminium.

La del ne s'allume pas tout de suite, maintenir la position. Sinon, essayer à différents endroits.

- Laisser allumer la DEL le plus longtemps possible et observer le papier d'aluminium.

- Faire la chaîne énergétique qui décrit ce qui se passe.

- Expliquer avec le modèle énergétique « la pile s'use »

Figure 163: texte distribué aux enseignants-stagiaires "la pile s'use"

Dans un premier temps, il est demandé aux enseignants-stagiaires de tracer la chaîne énergétique associée à une pile aluminium-air en fonctionnement. Il ne leur est pas laissé de temps de travail personnel et la chaîne est corrigée au tableau par F1A, en discussion avec les enseignants-stagiaires.

Ceux qui le souhaitent sont ensuite invités à suivre le protocole de réalisation de la pile, identique à celui habituellement distribué aux élèves (Figure 163).

F1A donne des conseils aux enseignants-stagiaires, en lien avec son expérience personnelle de la mise en place de ces travaux pratiques en classe. Ils concernent la préparation du matériel, les réactions habituelles des élèves et la manipulation expérimentale en elle-même ; nous les décrirons plus précisément dans l'analyse.

Une fois l'expérience réalisée (la del doit avoir brillé pendant plusieurs minutes, F1-12, 72-75), les enseignants-stagiaires sont invités à regarder les morceaux d'aluminium et à y constater la présence de trous (F1-12, 89-91).

Des enseignants-stagiaires discutent ensuite de la réalisation d'autres piles qui permettent d'allumer des ampoules en classe (F1-12, 115-125 : pile citron, pile Volta).

Analyse de l'activité – correction du tracé de la chaîne énergétique

Le Tableau 19 ci-après montre la répartition des rôles de F1A et des enseignants-stagiaires dans la correction de la chaîne.

objet ou événement considéré	nature	forme à tracer	ce qu'il faut écrire sous ou sur la forme	ce qu'il faut écrire dans la forme
pile / réactifs	réservoir	rectangle	aluminium + air	énergie chimique
« électricité » ¹	transfert	flèche	transfert électrique	NA
del	convertisseur	cercle	del	(rien)
« lumière » ¹	transfert	flèche	rayonnement	NA
environnement	réservoir	rectangle	classe	(en débat)

¹Nous reprenons les termes que les formateurs ont choisi d'utiliser pendant la formation, voir §11.1

	proposition enseignant-stagiaire
	proposition formateur
	non explicité

Tableau 19: éléments pris en charge par les formateurs et par les enseignants-stagiaires dans le tracé de la chaîne associée à la pile aluminium-air

La plupart des éléments de construction de la chaîne sont à la charge du formateur. Cette chaîne (la dernière de l'ensemble de la formation) comporte beaucoup d'implicites (éléments non explicités, en vert dans le tableau). On remarque que les éléments du monde des objets et événements sont peu mentionnés, et ne sont pas explicitement liés à la représentation qui en est faite sur la chaîne énergétique.

Cette chaîne énergétique est tracée avant la phase d'expérimentation, mais elle n'est pas mise en lien avec l'expérience et ne sera pas utilisée, reprise ou commentée par la suite.

Conseils pour les enseignants-stagiaires à destination des élèves

Tout au long de cet épisode, F1A donne des conseils pratiques aux enseignants-stagiaires pour qu'ils puissent mettre en œuvre cette expérimentation avec leurs élèves. Elle leur donne des indications relatives au matériel à utiliser (F1-12, 6-11, 57 : choix des lampes ; confection de pots réutilisables et de « boîtes à manipulation ») et des conseils pratiques pour la réalisation de la pile, par exemple :

« appuyez bien que votre charbon // il soit en contact de l'aluminium il y en a ils me font comme un petit // transat / où / ça ne marche pas quoi / donc là il faut que ça touche » (F1A, F1-12, 67-69)

Elle relate des événements fréquemment associés à cette expérience et explique de quelle manière elle y réagit :

- elle explique que systématiquement, il y a deux groupes d'élèves pour lesquels l'expérience ne fonctionne pas, sans qu'elle sache expliquer pourquoi (F1-12, 63-64) ;

- certains élèves pensent que les trous observés dans l'aluminium sont dus au frottement du charbon sur le papier d'aluminium : F1A leur fait alors frotter une feuille d'aluminium avec du

charbon afin qu'ils comparent les traces obtenues aux trous formés pendant l'expérience (F1-12, 92-94).

Interprétation de la présence de trous dans la feuille d'aluminium

La présentation de l'expérience et de sa réalisation en classe par F1A ainsi que les échanges entre F1A et les enseignants-stagiaires mettent en évidence trois interprétations possibles pour expliquer les trous observés sur le papier d'aluminium, que nous avons fait figurer sur la Figure 164 ci-après, en relation avec la théorie des deux mondes.

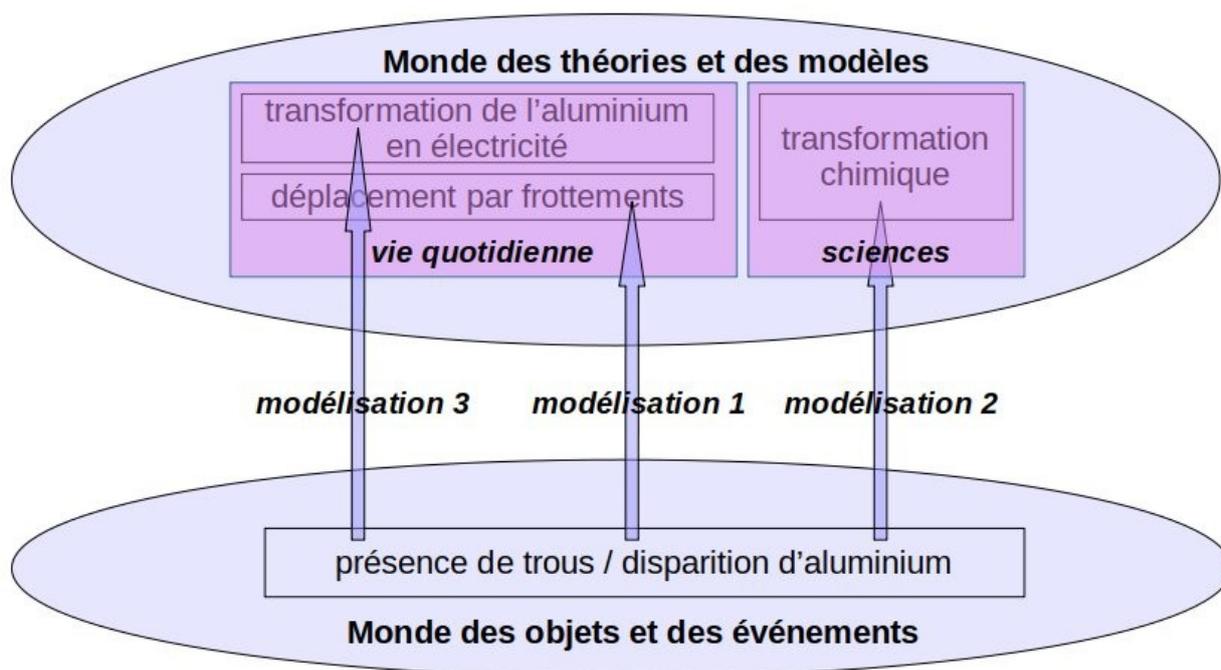


Figure 164: multiples interprétations de la présence de trous dans la feuille d'aluminium

Comme nous l'avons décrit dans le paragraphe précédent, l'interprétation de la présence de trous dans la feuille d'aluminium par des élèves en lien avec le frottement du charbon sur cette feuille (« modélisation 1 », Figure 164) a été évoquée par F1A, qui a proposé une prise en charge de cette interprétation erronée : les élèves sont invités à comparer cette feuille à une feuille qui a été frottée par un morceau de charbon (F1-12, 92-94). F1A évoque également la possibilité de mettre en place une expérience « témoin », où la pile ne « débite » pas (F1-12, 95-96).

Comme le montrent les citations suivantes (en particulier, les expressions mises en relief), F1A considère la transformation chimique (monde des théories et des modèles) comme assimilable directement à la transformation de la matière, événement observable :

« c'est ce que je dis aux élèves / fais débiter la pile parce que **je veux voir que la matière elle se transforme bien** » (F1A, F1-12, 71-72)

« pourquoi je les laisse débiter / on dit / parce que moi **je veux voir que la matière se transforme** // comme je vais pas la voir dans le charbon // tu changes de place / on va la voir dans » (F1A, F1-12, 79-81)

« eh bien il a quoi / **s'il s'est transformé / si il s'est transformé c'est qu'il n'est plus là** // hein on parle comme avec les élèves // **s'il n'est plus là on va voir plein de petits trous** » (F1A, F1-12, 85-86)

Ici, l'observation de la disparition partielle d'une substance chimique est considérée comme nécessaire (F1-12, 69-70) et suffisante pour caractériser la transformation chimique (« modélisation 2 », Figure 164). Les phénomènes chimiques mis en jeu, présentés comme secondaires, ne sont pas discutés pendant la formation (F1A, F1-12, 63-65 ; F1A, F1-12, 98-99).

Le « devenir » de la substance n'est pas évoqué et n'a pas vocation à être mentionné en classe (F1-12, 98-99).

La conclusion proposée par F1A à destination des élèves peut laisser croire que la matière qui a disparu a été transformée en énergie :

« la matière elle n'a pas disparu / par magie // elle a disparu parce qu'elle a été utilisée pour faire un transfert électrique // donc on finit la leçon en disant // la pile s'use car / le réservoir d'énergie chimique se vide à cause d'un transfert électrique vers la del // voilà // le but c'est qu'ils me fassent ça / et globalement au mot près ils mettent énergie chimique / transfert électrique vers la del // donc là // on travaille ce fameux point que je suis un réservoir de quelque chose // qui transfère / un autre truc / c'est encore un peu magique // et je leur dis vous attendrez donc // » (F1A, F1-12, 100-106)

De ce fait, un enseignant-stagiaire évoque la possibilité que certains élèves croient « que les atomes d'aluminium sont transformés en électricité » (F1-12, 107-108) (« modélisation 3 », Figure 164). F1A déclare ne pas prendre en compte ce type de raisonnement, arguant que les élèves n'ont pas de bagage scientifique suffisant pour parler d'atomes, et ne relevant pas la conception relative à la transformation de matière en énergie (F1A, F1-12, 109-111).

Conclusion de section

L'ensemble des tâches prévues par les formateurs ont été proposées aux enseignants-stagiaires : la composante cognitive des pratiques des formateurs a globalement été conforme à celle décrite dans nos analyses *a priori*. Cependant, nous avons constaté un écart significatif et récurrent entre la manière dont elles se sont déroulées et les choix *médiatifs* qui avaient été faits par les formateurs en amont de la formation.

De nombreuses tâches mobilisant le modèle scientifique scolaire de l'énergie promu par les formateurs ont été proposées aux enseignants-stagiaires. Nous avons mis en évidence que les durées laissées à ces derniers pour effectuer les tâches était restreintes et plus courtes que celles prévues *a priori*. Nous avons aussi mis en évidence que peu d'espace a été laissé aux enseignants-stagiaires pendant les corrections des tâches, notamment celles mettant en jeu l'élaboration de chaînes énergétiques.

17.4. Conclusion

Pendant le début du stage de formation, F1B présente un modèle scientifique de l'énergie : c'est une abstraction mathématique, qui caractérise l'état d'un système. Il évoque les formes que peut prendre l'énergie et les différents modes de transferts de l'énergie sous un angle scientifique. À ce modèle scientifique succède un modèle scolaire, dans lequel l'énergie n'est plus considérée comme un concept abstrait, mais comme quelque chose de stockable. Les formes et modes de transferts de l'énergie évoqués sont adaptés pour l'enseignement et l'apprentissage.

Ce modèle, progressif, prend appui en particulier sur certaines caractéristiques de l'énergie : la stockabilité, les transferts et les conversions d'énergie, et sur un paradigme : l'énergie est exclusivement stockable, en opposition avec les transferts d'énergie. Il comporte deux éléments spécifiques : les *convertisseurs* et les *réservoirs*, associés aux *fonctions énergétiques* des objets – ou des systèmes –, dont on ne comprend pas toujours la place dans la modélisation, et qui ne peuvent pas être associés à un même objet. La conservation de l'énergie, présentée comme un principe fondamental de l'énergie, n'est pas mobilisée au sein du modèle.

Nous remarquons que la structure générale du stage est descendante. Elle est introduite par des apports théoriques, de nature scientifique (modèle scientifique de l'énergie) et didactique (modèle scientifique scolaire de l'énergie). Les enseignants-stagiaires sont invités à effectuer des tâches à destination d'élèves, qui sont corrigées par les formateurs, sans réelle prise en compte des réalisations et des erreurs éventuelles des enseignants-stagiaires. Le modèle, initialement présenté comme un choix parmi d'autres par les formateurs, tend à leur être imposé au fur et à mesure de l'avancée du stage.

Le « défi énergétique » est mentionné à plusieurs reprises par les formateurs, et présenté comme lié à la distinction nécessaire entre transferts (flux d'énergie) et énergie (stocks d'énergie). Les problématiques sociétales liées à l'énergie ne sont pas associées aux concepts de dégradation (ou de dissipation), jamais mentionnés par les formateurs – tout comme les frottements. Les pertes énergétiques sont évoquées marginalement, à l'initiative des enseignants-stagiaires, sans être mises en relation avec ces problématiques. Elles sont présentées comme peu ou mal représentables sur les chaînes énergétiques.

Le modèle proposé inclut une représentation par des chaînes énergétiques de type *pendant*, qui sont parfois confondues avec le modèle. Elles représentent les propriétés de transfert et de conversion de l'énergie et, dans une moindre mesure, son stockage et les formes qu'elle peut prendre. Selon les formateurs, elles représentent également la conservation de l'énergie. Ces chaînes induisent une forme de substantialisation de l'énergie et mobilisent un raisonnement linéaire causal contre lequel les formateurs mettent en garde les enseignants-stagiaires.

Les formateurs partagent un modèle scientifique scolaire de l'énergie commun : nous avons montré une cohérence globale entre leurs propos, et ils justifient leurs rares divergences d'approche, dont ils ont conscience et qu'ils ne présentent pas comme fondamentales (représentation ou non d'un réservoir initial et final sur la chaîne).

Analyse croisée des chapitres 16 et 17

L'analyse du discours de F1A, F1B et F1C montre une cohérence générale dans les connaissances professionnelles qu'ils mobilisent, dans les stratégies de formation qu'ils souhaitent mettre en place, et dans le modèle scientifique scolaire de l'énergie qu'ils promeuvent.

Les dynamiques des échanges mises en évidence par l'analyse des entretiens expliquent et justifient les prises de parole pendant la formation : F1B prend en charge les parties dites théoriques, c'est-à-dire l'éclairage scientifique, présenté comme une justification du modèle scolaire proposé, et la présentation du modèle scientifique scolaire de l'énergie. À l'inverse, F1A et F1C prennent en charge tout ce qui concerne l'enseignement de l'énergie au collège (progressions, activités, matériel, organisation du travail en classe, etc.)

Logiques d'action liées à la mise en place et à la mise en œuvre de la formation

Ce stage de formation a été construit et prend fortement appui sur certaines contraintes :

- institutionnelles, liées à l'obligation d'enseigner l'énergie en collège, et à l'absence de modèle institutionnel (véhiculé par les programmes et les manuels) clair, précis et opérationnel ;
- sociales, liées à un besoin fort de normes partagées par la communauté enseignante, à tous les niveaux (*a minima* au sein d'un établissement) ;
- personnelles, liées à une mauvaise compréhension passée de l'énergie pour F1A et F1C, et à une expertise didactique sur l'énergie pour F1B.

Les formateurs ont une large connaissance des difficultés relatives à l'enseignement et à l'apprentissage de l'énergie. Les difficultés enseignantes prises en considération correspondent à celles qu'ont rencontrées F1A et F1C dans leur vie professionnelle. Les difficultés des élèves sont pour partie *réelles*, c'est-à-dire conformes à celles mises en évidence par des recherches en didactique, et pour partie *supposées*, comme celles liées aux phénomènes électriques. Les formateurs proposent des stratégies d'enseignement claires, réfléchies et justifiées par ces connaissances.

La stratégie globale de formation mise en place est directement liée au parcours professionnel de F1A et F1C et à la genèse de la formation. Il s'agit de faire prendre conscience aux enseignants-stagiaires des difficultés qu'ils rencontrent pour enseigner l'énergie puis de leur proposer un modèle qui pallie ces difficultés, ainsi qu'une progression et des activités qui facilitent sa mise en place en classe. F1B qualifie cette démarche de *formation par la recherche action* : elle consiste à mettre à disposition des enseignants-stagiaires des ressources – un modèle, des activités-élèves, une progression – ayant montré leur efficacité pour l'enseignement – ici, de l'énergie.

Pendant la formation, le temps et l'espace laissés aux enseignants-stagiaires sont restreints : les durées réelles de mise en activité sont significativement plus courtes que celles prévues initialement, et les corrections sont essentiellement à la charge des formateurs. En particulier, la plupart des chaînes énergétiques sont projetées, sans être mises en regard des propositions faites par les enseignants-stagiaires. Les questions liées à la prise en compte des phénomènes dissipatifs, qui ne sont pas pris en charge dans le modèle, sont mises de côté.

Pour ces raisons, nous pouvons dire que la formation suit une logique *descendante, prescriptive*, bien que les formateurs présentent leur modèle comme un choix parmi d'autres possibles. La correction des questions 4 et 5 du QCM illustre le glissement sémantique de F1B, qui passe de la proposition d'un modèle à l'imposition de ce modèle aux enseignants-stagiaires.

Portée du modèle et des chaînes énergétiques

Pendant le stage de formation, F1B présente le modèle scientifique scolaire de l'énergie choisi *comme un modèle scolaire*, en l'associant à une démarche de modélisation : il commence par évoquer le concept scientifique d'énergie ainsi que certains aspects de modèles scientifiques de l'énergie, puis il discute de certaines spécificités liées à l'apprentissage et à l'enseignement de ce concept, avant de présenter le modèle scolaire de l'énergie qu'il promeut. Cependant, il ne met pas clairement en relation les éléments de ce modèle et les éléments de la théorie scientifique de l'énergie¹⁷⁴.

Le modèle scientifique scolaire de l'énergie proposé est un modèle progressif, qui prend en charge en particulier une difficulté mise en évidence par la recherche en didactique : la confusion entre formes d'énergie et transferts d'énergie. Il repose sur la distinction entre formes d'énergie, « stockées » dans les systèmes, et transferts d'énergie, échangés entre systèmes. Les transferts d'énergie sont présentés comme des observables, et leur place dans la modélisation n'est pas claire (ils appartiennent à la fois au monde empirique et au monde théorique). Dans leur discours, nous avons vu que les formateurs assimilent *réellement* les transferts d'énergie à des observables, en dehors du modèle scolaire : l'utilisation de ce modèle pourrait avoir modifié leurs connaissances *de la physique*. De la même manière, ils ne mettent pas en évidence les étapes de modélisation qui permettent de passer d'un objet à un élément du modèle et assimilent fréquemment les éléments du modèle (convertisseur, réservoir, transfert) aux objets et événements de la vie courante (par exemple : grille-pain, pile, lumière).

La chaîne énergétique est présentée comme l'unique forme de représentation des propriétés de l'énergie de ce modèle scientifique scolaire. Or, elle ne permet pas la représentation des transformations d'énergie, de la conservation de l'énergie et de la dégradation de l'énergie. Ces caractéristiques sont donc, de fait, exclues du modèle. La conservation de l'énergie et sa transformation ont été évoquées par les formateurs, mais *en dehors* de la présentation et de l'utilisation du modèle scientifique scolaire de l'énergie pour le collègue. La dégradation n'a pas été mentionnée : nous ne savons pas dans quelle mesure elle fait partie des connaissances professionnelles des formateurs, possiblement parce que le modèle scolaire qu'ils mobilisent l'invisibilise.

Bien que certaines aient été évoquées dans les rappels théoriques de début de stage, nous avons constaté qu'aucune expression littérale ne fait pas partie du modèle scolaire de l'énergie présenté pendant la formation. De ce fait, le modèle proposé ne recouvre pas l'ensemble des caractéristiques de l'énergie mentionnées dans le programme de Cycle 4. Il est donc probable qu'un autre modèle scientifique scolaire de l'énergie coexiste avec celui-ci *dans la classe de physique* : un modèle associé à la mécanique, qui prend en charge les transformations de l'énergie et la modélisation

¹⁷⁴ Il présente ce modèle comme un modèle *de la didactique*, en opposition aux modèles *scientifiques* : selon lui, le conseil supérieur des programmes, les rédacteurs de manuels et l'inspection ne s'emparent pas de ce modèle parce qu'il *n'est pas scientifique*.

mathématique de la forme cinétique de l'énergie. La dissociation de ces deux modèles – pourtant compatibles l'un avec l'autre – dans le discours des formateurs pose question ; l'identification exclusive du modèle à une forme de représentation en est une explication. Pourtant, la possibilité d'utiliser d'autres représentations – comme des chaînes *avant-après* – a été évoquée, mais n'a pas été retenue par les formateurs, car jugée trop complexe.

Ce modèle est présenté comme un modèle scientifique scolaire de l'énergie *de la physique*, qui coexiste avec d'autres modèles scientifiques scolaires de l'énergie (de la technologie, des SVT...) et avec un modèle sociétal de l'énergie. De ce fait, il invisibilise le caractère unificateur de l'énergie. Il est possible que cette facette du modèle ait un impact sur les connaissances professionnelles des formateurs : aucun d'entre eux n'évoque le caractère universel et unificateur de l'énergie – ni pendant les entretiens, ni pendant le stage de formation.

Par ailleurs, les formateurs ne mettent les modèles scolaires sociétal et de la physique en regard l'un de l'autre que partiellement, et par une vision consumériste de l'énergie – sans prise en compte de sa dégradation.

Questions encore ouvertes

Nous avons remarqué que les chaînes énergétiques tracées et partagées pendant ce stage ont une fonction essentiellement *illustrative, représentative*. Par ailleurs, la seule utilisation *explicative* des chaînes (tâche 7a) a mis en jeu un raisonnement lacunaire qui n'a pas permis de répondre correctement à la question posée. Nous avons également identifié une utilisation heuristique possible pour les chaînes énergétiques (tâche 7b), qui n'a pas été proposée par les formateurs.

Le modèle promu par les formateurs repose sur sa représentation par des chaînes énergétiques, qui comportent certaines limites inhérentes à ce type de représentations : la substantialisation de l'énergie et l'utilisation d'un raisonnement linéaire causal, présentés comme un appui pour les apprentissages en didactique. Or, F1B met en garde les enseignants-stagiaires contre le raisonnement linéaire causal, présenté comme un problème majeur, à éviter absolument dans l'enseignement ; la substantialisation de l'énergie n'est pas évoquée.

Les phénomènes électriques occupent une place à part dans ce modèle et dans la formation : ils ne sont pas présentés comme *autant observables* que les autres modes de transfert, ils sont abordés *après* les autres modes de transfert, la pile est présentée – sans raison apparente – comme un objet particulièrement difficile à modéliser, et l'explication de l'usure de la pile par l'utilisation d'une chaîne énergétique pose question (tâche 7a). Nous n'avons pas trouvé de justification à cela.

Comparaison entre les stages F1, F2, F3, F4, F5 et F6

Nous avons mis en évidence certaines similarités et certaines spécificités entre les six stages de formation continue à l'enseignement de l'énergie que nous avons analysés.

Les stages de formation F1 et F3 ont été construit selon une même dynamique : F1A, F1C et F3A ont rencontré des difficultés pour enseigner l'énergie, ont pris conscience de l'absence de consensus institutionnel pour l'enseignement de l'énergie, puis se sont appropriées un modèle scientifique scolaire de l'énergie. Par la suite, elles ont souhaité monter un stage de formation qui puisse permettre à d'autres enseignants – dont elles supposent qu'ils partagent leurs difficultés – de découvrir, de s'approprier et de mettre en place ce modèle dans leurs classes. Cependant, les modèles choisis diffèrent : F1A et F1C proposent un modèle scientifique scolaire de l'énergie, tandis que F3A propose un modèle scientifique de l'énergie. Elles font appel à d'autres intervenants, considérés comme experts de l'énergie (pour F3A) ou de l'enseignement de l'énergie (pour F1A et F1C), pour co-animer ces formations avec elles et contrôler ce qu'elles proposent.

Les stages de formation F4, F5 et F6 sont adossés à un même organisme de formation. Les stratégies de formation de F4 et F6 présentent des similarités fortes (mise en activité des enseignants-stagiaires pour résoudre une tâche par homologie, visite d'un site industriel ou d'une entreprise en lien avec le concept sociétal d'énergie). Cependant, F5A propose une formation axée sur la compréhension de l'énergie en mécanique, destinée à aborder l'enseignement de l'énergie par une démarche d'investigation – et sans lien avec le monde scientifique professionnel.

Des chaînes énergétiques sont proposées pendant les stages de formation F1 et F2, auxquels nous avons assisté. Elles sont utilisées essentiellement dans une fonction représentative (du moins en collègue).

Les formations F2 et F3, ouvertes aux enseignants de collège et de lycée, proposent un algorithme de résolution de problèmes qui repose sur l'utilisation du principe de conservation de l'énergie.

Les stages de formation F2, F4, F5 et F6 sont ouverts à des disciplines autres que la physique-chimie ; cependant, les formateurs des stages F2 et F5 axent leur formation sur un modèle scientifique scolaire de l'énergie *de la physique*. Les stages de formation F4 et F6 sont construits autour du concept sociétal d'énergie, qui n'est pas mis en relation avec le concept scientifique d'énergie.

D'une façon générale, les stages qui promeuvent un concept scientifique d'énergie – qu'il soit scolaire ou non – ne prennent pas en considération le concept sociétal d'énergie et, lorsqu'ils le font (F1), ils ne le mettent pas en regard de la propriété de dégradation de l'énergie, invisibilisée dans les modèles que nous avons caractérisés.

Conclusion générale

Nous avons caractérisé différents modèles scientifiques scolaires de l'énergie promus pour le Cycle 4 par l'institution, à travers une analyse de documents institutionnels (programme, documents d'accompagnement, manuels) et de pratiques déclarées et effectives de formation continue.

Pour conclure ce travail, nous commençons par rappeler les principaux éléments de réponses à nos questions de recherche, puis nous donnerons quelques éléments de discussions, avant de proposer de nouvelles perspectives de recherche.

Rappel des questions de recherche

Nos deux premières questions de recherche portent sur les modèles scientifiques scolaires de l'énergie institutionnels, et interrogent la cohérence entre ces modèles et les chaînes énergétiques qui leur sont associées :

QR1 : Quels sont les modèles scientifiques scolaires de l'énergie proposés par les différentes institutions ?

QR2 : Quels sont les chaînes énergétiques promues par les différentes institutions ? Quelles propriétés de l'énergie représentent-elles et ne permettent-elles pas de représenter ? Selon l'institution considérée, quels types de tâches doivent-elles permettre de résoudre ? Ces chaînes sont-elles cohérentes avec les modèles dont elles sont *a priori* des représentations ?

Notre troisième question de recherche s'intéresse à la formation continue à l'enseignement de l'énergie à destination d'enseignants de Cycle 4. Elle interroge les raisons qui expliquent les choix de formation et les choix de modèle de l'énergie des formateurs académiques :

QR3a : Pour quelles raisons les formateurs académiques privilégient-ils un certain modèle de l'énergie ainsi que l'usage – ou non – de certaines chaînes énergétiques ?

QR3b : Quelles sont les raisons qui expliquent les choix didactiques de formation à l'énergie effectués par les formateurs ?

Réponses aux questions de recherche

Les modèles scientifiques scolaires de l'énergie proposés dans le programme, les documents d'accompagnement et les manuels de Cycle 4 s'appuient sur les caractéristiques de formes, sources, conversions, transferts et conservation de l'énergie. Cependant, le plus souvent, ces documents institutionnels ne fournissent pas de définitions ou de descriptions claires pour ces mots, qui ne renvoient pas aux mêmes concepts selon les auteurs. En particulier, les formes d'énergie et les modes de transfert de l'énergie ne sont pas consensuels ; de ce fait, les conversions d'énergie, communément définies comme des *changements de forme d'énergie*, ne prennent pas le même sens dans les différents modèles.

Bien qu'elles ne figurent pas dans le programme de physique-chimie de Cycle 4, les chaînes énergétiques occupent une place importante dans la plupart des modèles de l'énergie proposés par les auteurs de manuels. Elles sont globalement cohérentes avec les modèles scolaires de l'énergie

dont elles sont issues : elles représentent différentes formes et conversions d'énergie – sans que soient distingués formes et transferts d'énergie. Selon la plupart de leurs auteurs, ces chaînes traduisent la conservation de l'énergie – bien qu'elles ne comportent pas de dimension temporelle. Les chaînes énergétiques analysées sont diverses, et leurs règles de construction sont difficiles à objectiver. Par ailleurs, les modèles scientifiques scolaires de l'énergie identifiés coexistent avec un modèle sociétal de l'énergie, sans que les liens entre modèle scolaire scientifique et modèle sociétal ne soient, le plus souvent, clairement établis.

Nous avons montré qu'il n'existe pas de modèle scientifique scolaire de l'énergie institutionnel rigoureusement objectivable dans les documents que nous avons analysés. De ce fait, nous posons l'hypothèse qu'il existe un besoin de formation à l'enseignement de l'énergie de la part des enseignants, comme le corroborent particulièrement les genèses des formations F1 et F3, qui se basent sur des expertises scientifiques de la didactique ou de la physique. De façon plus générale, nous avons montré que les stages de formation à l'énergie reposent sur différents *référents*, à l'origine de différents modèles de l'énergie : des modèles scientifiques et/ou didactiques, plus ou moins mathématiques, et des modèles sociétaux. Ces derniers, destinés à des enseignants non spécialistes des sciences, ne sont pas des modèles *scientifiques scolaires* à proprement parler. Les stages de formation continue à l'enseignement de l'énergie qui mettent en jeu un modèle scientifique scolaire de l'énergie sont structurés de façon similaire : dans un premier temps, les enseignants-stagiaires prennent conscience qu'il n'existe pas de normes associées à un modèle scientifique scolaire de l'énergie, puis les formateurs leur proposent un modèle, qu'ils les invitent ensuite à utiliser, puis, sur le long terme, à mettre en place dans leurs classes.

La représentation de phénomènes par des chaînes énergétiques impose de prendre en considération des systèmes et, de ce fait, d'opérer une distinction entre *ce qui a trait aux systèmes* et *ce qui se passe en-dehors des systèmes*. De ce fait, la construction et l'utilisation d'un modèle scientifique scolaire de l'énergie qui met en jeu des chaînes énergétiques implique une distinction claire entre l'énergie associée aux systèmes représentés et l'énergie reçue ou fournie par ces systèmes. Les définitions que nous avons proposées permettent cela :

- les *formes* d'énergie sont associées aux systèmes ;
- les *modes de transferts* de l'énergie qualifient les échanges d'énergie entre systèmes ;
- les changements de mode de transfert de l'énergie sont appelés *conversions* d'énergie ;
- les changements de forme d'énergie au sein d'un système sont appelés *transformation* d'énergie ;
- les changements de forme d'énergie entre systèmes sont appelés *modification* d'énergie.

Cependant, la question de ces définitions reste complexe : si elles tendent à devenir consensuelles en didactique, elles sont en partie incohérentes avec les définitions usuelles de la physique, notamment en ce qui concerne les transformations et conversions d'énergie.

La formation F1 propose un modèle initial basé sur un modèle scientifique scolaire issu de la recherche en didactique, qui repose sur l'utilisation de chaînes énergétiques et sur la distinction entre formes et transferts d'énergie – en cohérence avec nos définitions. Cependant, nous avons mis en évidence que son application effective en formation génère encore des questionnements.

Les formateurs qui animent la formation F2 ne partagent pas le même modèle scientifique scolaire initial de l'énergie. Un de ces modèles, qui présente un ancrage fort sur des chaînes

énergétiques, a été proposé de façon effective pendant le stage de formation. S'il opère une distinction entre formes d'énergie et transferts d'énergie, il ne définit pas les transferts comme ayant lieu *entre* des systèmes. Ce modèle est encore en cours d'élaboration et de stabilisation, comme le montre son utilisation en stage de formation.

L'analyse des tâches qui mettent en jeu des chaînes énergétiques (dans les documents d'accompagnement, les exercices de manuels et les séances de formation) a mis en évidence que ces chaînes ne sont, le plus souvent, pas *utilisées* : généralement, l'objectif à atteindre est celui de tracer une chaîne – et non de s'en servir.

Les tâches des manuels qui demandent l'utilisation de chaînes énergétiques sont très généralement résolubles par lecture directe des mots inscrits sur les chaînes (par exemple, identifier l'énergie fournie par un objet revient à lire le mot inscrit sur une flèche « sortante »). D'un point de vue praxéologique, la résolution de ces tâches fait appel à un savoir-faire, mais ne nécessite pas la mobilisation d'un savoir scientifique associé. Selon nous, cela est dû à l'absence de règles claires qui régissent l'élaboration – et la lecture – des chaînes énergétiques dans les manuels.

Pendant les séances de formation auxquelles nous avons assisté, les formateurs ont demandé à plusieurs reprises aux enseignants-stagiaires de tracer des chaînes énergétiques, associées au fonctionnement d'un appareil ou à une situation. Ces tâches ne sont pas proposées dans un but plus large que la représentation de ces situations. Une fois tracées, les chaînes n'ont que rarement été utilisées – dans la formation F1, l'utilisation d'une chaîne dans un but explicatif a été à l'origine d'un raisonnement lacunaire ; dans la formation F2, les chaînes sont présentées comme servant à établir des bilans énergétiques, or, la représentation d'une chaîne correcte ne peut pas se faire *avant* d'avoir établi le bilan énergétique associé.

Nous avons toutefois remarqué qu'il était possible d'utiliser une chaîne énergétique pour prédire ou expliquer une situation : par exemple, pour proposer des expériences permettant de réchauffer l'eau de la bouteille (tâche 7b, formation F1), ou pour déterminer quel panneau photovoltaïque est en cours d'utilisation (entretiens exploratoires). Ce type de questions semble adapté à un niveau scolaire de Cycle 4. Selon nous, il s'agit de tâches *incitatives*, dont le rôle est fondamental pour qu'une activité de modélisation soit efficace (Larcher, 1994, p.20-23 ; Genzling et Pierrard, 1994, p.48).

Discussion

Dans cette section, nous évoquons deux thèmes de discussion qui ont émergé de notre travail de recherche : celui du vocabulaire utilisé dans les modèles scientifiques scolaires de l'énergie et celui des liens entre les concepts sociétal et scientifique scolaire d'énergie.

Les mots des modèles scolaires

Les modèles scientifiques scolaires de l'énergie que nous avons décrits mobilisent certains concepts *a priori* identiques, mais qui ne prennent pas toujours le même sens. Par exemple, nous avons mis en évidence qu'il n'existe pas de concept « forme d'énergie » institutionnel pour le Cycle 4. Si la distinction entre formes d'énergie et transferts d'énergie est faite de façon ponctuelle dans certains manuels, elle n'y est jamais proposée de façon transversale, et les modèles scolaires

identifiés dans les manuels assimilent transferts et formes d'énergie. Les formateurs qui promeuvent des modèles reposant sur la distinction entre forme d'énergie et transfert d'énergie définissent une forme d'énergie comme étant « stockée » dans un système, par opposition à un transfert d'énergie.

Au cours de ce travail, nous avons réfléchi au sens qui est donné au mot « stock », et questionné sa pertinence au sein d'un modèle scientifique de l'énergie pour l'enseignement. D'un point de vue sémantique, l'énergie « stockée » est une énergie « contenue », et se rapproche davantage de l'énergie *interne* que de l'énergie *totale* d'un système. Selon nous, en particulier, il est étonnant – et contre-intuitif – de qualifier l'énergie cinétique d'un système d'énergie « stockée ».

Nous posons l'hypothèse que les modèles scolaires qui font appel à la notion de *stockage* de l'énergie sont issus du modèle scientifique de la thermodynamique. En effet, dans ce modèle, on s'intéresse à des systèmes immobiles, dont l'énergie est assimilée à l'énergie *interne*, et qui reçoivent ou émettent de l'énergie, par travail ou par chaleur. Le « stock » d'énergie est mis en relation avec l'augmentation ou la diminution de l'énergie interne du système. Bien qu'adapté au modèle thermodynamique de l'énergie, ce vocable nous semble délicat à transposer *tel quel* à l'enseignement de l'énergie, vue comme un concept unificateur et, de ce fait, prenant en charge les formes d'énergie mécaniques.

De la même manière, définir les convertisseurs comme des systèmes qui *ne stockent pas* d'énergie pose question : tout se passe comme si l'énergie *glissait* sur ces systèmes, ne pouvait pas y pénétrer – or, il s'agit uniquement de systèmes dont la quantité d'énergie ne varie pas au cours du temps, pendant le phénomène considéré.

D'autres éléments langagiers utilisés dans les modèles scientifiques scolaires posent question : en particulier, les mots *réservoir*, *conversion* et *transformation* ne prennent pas le même sens en physique qu'en didactique – et, *a fortiori*, dans les modèles institutionnels analysés. Ils prennent un sens encore différent dans le langage courant.

Concept sociétal d'énergie, concept scientifique d'énergie, dégradation de l'énergie

L'enseignement de l'énergie et son étude en didactique ont connu un essor à partir des années 1970 – à la suite du premier choc pétrolier – pour que le thème de l'énergie, omniprésent au quotidien, soit correctement compris par les élèves d'un point de vue scientifique (Koliopoulos et Tiberghien, 1986 ; Bécu-Robinault et Tiberghien, 1998). De nos jours, les enjeux sociétaux liés à l'énergie sont particulièrement importants – difficultés d'approvisionnement en gaz des suites de la guerre en Ukraine, prix de l'essence, du gaz et de l'électricité, pollution liée à l'utilisation de ressources fossiles, gestion des déchets nucléaires, sécurité des installations nucléaires, etc.

Selon nous, l'enseignement de l'énergie au Cycle 4 répond à un double objectif. D'une part, il s'agit de former à la science, c'est-à-dire aux concepts scientifiques et à la démarche scientifique, notamment pour permettre aux élèves qui le souhaitent de poursuivre leur cursus au lycée. D'autre part, il s'agit de former des citoyens, capables de comprendre les enjeux du monde qui les entoure – et ce d'autant plus qu'en France la fin du Cycle 4 correspond à la fin de la scolarité obligatoire.

Notre travail de recherche a mis en évidence que le principe de dégradation de l'énergie ne fait pas partie des modèles scientifiques scolaires de l'énergie pour le Cycle 4.

La mobilisation de ce principe est pourtant nécessaire à la fois à la bonne compréhension d'un grand nombre des enjeux sociétaux liés à l'énergie, et à l'apprentissage du principe de conservation de l'énergie, qui, lui, fait partie de la plupart des modèles scolaires de l'énergie pour le Cycle 4.

Ouverture et perspectives

Nous avons identifié plusieurs axes de recherche pouvant permettre de prolonger le travail présenté dans ce manuscrit, relatifs à l'utilisation des chaînes énergétiques, aux liens à établir entre concept scientifique scolaire d'énergie et concept sociétal d'énergie, et à la formation des enseignants.

Nous avons relevé et analysé un grand nombre de chaînes énergétiques, en déterminant quelles caractéristiques de l'énergie elles peuvent ou ne peuvent pas représenter et quels types de tâches elles permettent de résoudre, selon leurs auteurs. Cependant, nous n'avons pas interrogé les types de tâches qu'elles permettent de résoudre *dans l'absolu*. Pour ce faire, l'établissement d'une praxéologie d'utilisation des chaînes énergétiques pourrait être envisagée. Par ailleurs, l'impact de l'utilisation de chaînes énergétiques n'a, à notre connaissance, jamais été évalué. En particulier, nous posons la question de déterminer dans quelle mesure l'utilisation de chaînes de type *pendant* est un levier ou un frein à une bonne compréhension du principe de conservation de l'énergie.

Dans ce travail, nous avons interrogé les relations entre le concept scientifique scolaire et le concept sociétal d'énergie, dans les manuels scolaires et dans le discours des formateurs. D'un point de vue scientifique, le lien entre ces deux concepts passe par la compréhension du principe de conservation et, surtout, du principe de dégradation de l'énergie. Or, nous avons mis en évidence que ce dernier ne fait pas partie des modèles de l'énergie pour le Cycle 4. Une perspective de recherche consisterait à construire une séquence d'enseignement – ou à proposer un stage de formation – visant à concilier ou à faire dialoguer ces deux modèles, en appui sur le principe de dégradation de l'énergie.

Certains stages de formation promeuvent l'utilisation d'un modèle scientifique scolaire de l'énergie, présenté comme plus efficient que la plupart des modèles habituellement utilisés dans l'enseignement. Cependant, nous supposons que, avant d'assister au stage de formation, les enseignants-stagiaires mobilisent des modèles scientifiques scolaires de l'énergie dans leurs enseignements, probablement différents les uns des autres, et différents de celui qui leur est présenté pendant la formation. La question de l'impact de la formation sur le modèle scientifique scolaire mis en œuvre par l'enseignant en classe pourrait être étudiée lors d'une future recherche.

Bibliographie

- Agabra, J. (1986). Échanges thermiques. *Aster*, 2, 1-41.
- Akas, R. (2018). *Électromagnétisme – Électrostatique et magnétostatique. Charges, champs, milieux matériels*. Ellipses.
- Akas, R. (2020). *Électromagnétisme – Propagation des ondes électromagnétiques*. Ellipses.
- Akbi, M. (2019). *Magnétostatique et induction*. Ellipses.
- Akbi, M. (2021). *Ondes électromagnétiques*. Ellipses.
- Alibert, F., Fernoux, P., Massa, F., Soucille-Dalle, B. & Wozniak, S. (2017). *Microméga Physique Chimie Le manuel de cycle*. Hatier.
- Amauger, F., Antmann, A., Bost, É., Boulloc, M., Coppens, N., Gerber, N., ... Renault, O. (2017). *Physique Chimie Cycle 4*. Nathan.
- Atkins, P., Jones, L. et Laverman, L. (2014). *Principes de chimie*. (traduit par A. Pousse; 6^e éd.). De Boeck Supérieur.
- Bächtold, M. et Munier, V. (2014). Enseigner le concept d'énergie en physique et éduquer à l'énergie : rupture ou continuité ? (Actes des Huitièmes rencontres scientifiques de l'ARDiST). *Revue SKHOLÉ*, 18(1), 21-29.
- Bächtold, M., Munier, V., Guedj, M., Lerouge, A. et Ranquet, A. (2014). Quelle progression dans l'enseignement de l'énergie de l'école au lycée ? Une analyse des programmes et des manuels. *RDST*, 10, 63-91.
- Ballini, P., Robardet, G. et Rolando, J.-M. (1997). L'intuition, obstacle à l'acquisition de concepts scientifiques. Propositions pour l'enseignement du concept d'énergie en première S. *Aster*, 24, 81-112.
- Ballini, P., Robardet, G. et Rolando, J.-M. (1998). Construire le concept d'énergie en classe de première S. *BUP*, 92(800), 23-40.
- Barde, M., Bigorre, M., Dessaint, S., Lémonie, C., Matagne, E., Poudens, B., ... Théboeuf, D. (2017). *Physique Chimie Cycle 4*. Hachette Éducation.
- Barberousse, A., Kistler, M. et Ludwig, P. (2000). *La philosophie des sciences au XX^e siècle*. Flammarion.
- Bécu-Robinault, K. (1997). Rôle de l'expérience en classe de physique dans l'acquisition des connaissances sur les phénomènes énergétiques. (Thèse de doctorat). Université Claude Bernard – Lyon I, France.
- Bécu-Robinault, K. et Tiberghien, A. (1998). Integrating experiments into the teaching of energy. *International Journal of Science Education*, 20(1), 99-114.

- Begin, N., Bullier, S., Durgeau, F., Jouet, O., Keuk, O., Le Bourquin, C., ... S., Pihée, L. & Sabra, W. (2017). *Cycle 4 Physique Chimie*. Magnard.
- Bélanger, A., Caïtucoli, L., Castelas, T., Delvalle, A., Fosset, G., Garrabos, N., ... Vidal, G. (2017). *Collection Regaud-Vento Physique Chimie Cycle 4*. Bordas.
- Blanc, S., Guita, S., Chesnais, F., Chesnais, O., Ferron, S., Gredy, A., ... Bregere, C. (2017). *Physique Chimie Manuel unique Cycle 4*. lelivrescolaire.fr
- Bental, D., Tiberghien, A., Baker, M. J. et Megalakaki, O. (1995). *Analyse et modélisation de l'apprentissage des notions de l'énergie dans l'environnement CHENE*. Dans les Actes des Quatrièmes Journées EIAO de Cachan, ENS de Cachan, 22-24.
- Bevilacqua, F. (2014). Energy : learning from the past. *Science and Education*, 23, 1231-1243.
- Bodzin, A. (2012). Investigating urban eighth-grade students' knowledge of energy resources. *International Journal of Science Education*, 34(8), 1255-1275.
- Borel, L. (1987). *Thermodynamique et énergétique* (2^e éd., vol. 1, 1^{er} tome). Presses Polytechniques romandes.
- Bouard, R., Canac, S. et Kermen, I. (2022). Modélisation des transformations chimiques : mise en regard d'un programme et de pratiques enseignantes. *RDST*, 25, 69-100.
- Boyer, A. et Givry, D. (2016). Quelles conditions influencent la réalisation de chaînes énergétiques par des élèves de cycle 3 (grade 4 et 5) ? *Educational Journal of the University of Patras UNESCO Chair*, 3(2), 209-220.
- Brewe, E. T. (2002). *Inclusion of the energy thread in the introductory physics curriculum : an example of long-term conceptual and thematic coherence*. (Thèse de doctorat). Arizona State University, USA.
- Brewe, E. T., (2011). Energy as a substancelike quantity that flows: Theoretical considerations and pedagogical consequences. *Physical Review Special Topics – Physics Education Research*, 7(2), 020106.
- Bruguière, C., Sivade, A. et Cros, D. (2002). Quelle terminologie adopter pour articuler enseignement disciplinaire et enseignement thématique de l'énergie, en classe de première de série scientifique ? *Didaskalia*, 20, 67-100.
- Brun, A., Chivas, S., Denocq, L., Krygiel, O. & Marois, A. (2017). *Espace Physique Chimie Cycle 4*. Bordas.
- Brunet, É., Hocquet, T. et Leynoras, X. (2019). *Cours de thermodynamique*. Sorbonne Université. <http://www.phys.ens.fr>
- Canac, S., Javoy, S. et Kermen, I. (2021). Travaux pratiques de chimie en première année d'université : tâches étudiantes et pratiques enseignantes dans trois universités. *RDST*, 24, 87-112.

- Cassirer, E. (1977). *Substance et fonction : éléments pour une théorie du concept* (traduit par P. Caussat). Éditions de Minuit.
- Chabalengula, V. M., Sanders, M. et Mumba, F. (2012). Diagnosing students' understanding of energy and its related concepts in biological contexts. *International Journal of Science and Mathematics Education*, 10(2), 241-266.
- Chang, R. et Overby, J. (2019). *Chimie générale* (traduit par A. Arpin, 5^e éd.). De Boeck Supérieur.
- Chevallard, Y. (1985). *La transposition didactique : du savoir savant au savoir enseigné*. La Pensée Sauvage.
- Chevallard, Y. (1998). Analyse des pratiques enseignantes et didactique des mathématiques : l'approche anthropologique. Dans les *Actes de l'Université d'été d'Analyse des pratiques enseignantes et didactique des mathématiques*, IREM de Clermont-Ferrand, 91-120.
- Chisholm, D. (1992). Some energetic thoughts. *Physics Education*, 27, 215-220.
- Chomat, A., Larcher, C. et Méheut, M. (1988). Modèles particuliers et activités de modélisation en classe de quatrième. *Aster*, 7, 143-184.
- Colonnese, D., Heron, P., Michelini, M., Santi, L. et Stefanel, A. (2012). A vertical pathway for teaching and learning the concept of energy. *Review of Science, Mathematics and ICT Education*, 6(1), 21-50.
- Concept. (2014). Dans A. Rey (dir.), *Le Robert illustré et son dictionnaire Internet*. Le Robert.
- Coquidé, M, Fortin, C. et Lasson, C. (2010). Quelles reconfigurations curriculaires dans le cadre d'un enseignement intégré de science et de technologie ? Dans les *Actes du congrès de l'Actualité de la Recherche en Éducation et en Formation (AREF)*, Université de Genève, septembre 2010.
- Coquidé, M, Fortin, C. et Lasson, C. (2013). D'un curriculum auto-prescrit à des curriculums co-produits : le cas de l'enseignement intégré de science et technologie au collège. *Spirale-Revue de Recherches en Éducation*, 52 (1), 9-33.
- Cotignola, M., Bordognac, C., Punte, G. et Cappannin, O. (2002). Difficulties in learning thermodynamic concepts : are they linked to the historical development of this field ? *Science and Education*, 11, 279-291.
- Crépin-Obert, P., Canac, S., Chorlay, R., Roux-Goupille, C., Décamp, N., Javoy, S. et Kermen, I. (2021). Analyse de séances "ordinaires" intégrant l'histoire des sciences. Regards croisés sur quatre pratiques enseignantes en sciences et en mathématiques. *11^e rencontres scientifiques de l'ARDiST*, Bruxelles, Belgique, mars 2021.
- Darot, E. (1986). Enseignement de l'énergie – Une recherche pluridisciplinaire de l'INRP. *Aster*, 2, 105-132.
- Devi, R., Tiberghien, A., Baker, M. et Brna, P. (1996). Modelling students' construction of energy models in physics. *Instructional Science*, 24(4), 259-293.

- Diu, B., Guthmann, C., Lederer, D. et Roulet, B. (2007). *Thermodynamique*. Hermann.
- Doménech, J. L., Gil-Pérez, D., Gras-Marti, A., Guisasola, J., Martinez-Torregrosa, J., Salinas, J., Trumper, R., Valdés, P. et Vilches, A. (2007). Teaching of Energy Issues : A Debate Proposal for a Global Reorientation. *Science and Education*, 16, 43-64.
- Driver, R. et Easley, J. (1978). Pupils and paradigms: A review of literature related to concept development in adolescent science students. *Studies in Science Education*, 5, 61-84.
- Drouin, A.-M. (1988). Le modèle en questions. *Aster*, 7, 1-20.
- Ducasse, F. et Pujol, O. (2019). Le principe de conservation de l'énergie – Pilier de l'enseignement de l'énergie dans le secondaire ? *BUP*, 113(1010), 31-60.
- Ducourant, D. (2019). Autour du mot énergie – Partie 1. *BUP*, 113(1010), 77-120.
- Duit, R. (1981). *Students' notions about the energy concept – before and after physics instruction*. (Presented workshop at problems on concerning students' representation of physics and chemistry knowledge at the Padagogische Hochschule Ludwigsberg).
- El Hajjami, A., Lahlou, F, Benyamna, S. et Tiberghien, A. (1999). Élaboration d'une méthode d'analyse des discours d'enseignants ; cas de l'énergie. *Didaskalia*, 15, 59-86.
- Ellse, M. (1988). Transferring not transforming energy. *School Science Review*, 69(248), 427-437.
- Énergie. (s.d.). Dans *TLFi*. <http://stella.atilf.fr/Dendien/scripts/tlfiv5/visusel.exe?12;s=1203265185;r=1;nat=;sol=1;>
- Énergie. (2020). Dans A. Rey (dir.), *Le Petit Robert de la langue française*. Le Robert.
- Énergie. (2022). Dans *Le Grand Robert de la langue française en ligne*. Le Robert. <https://grandrobert-lerobert-com.bnf.idm.oclc.org/robert.asp>
- Énergie. (2007). Collectif, *Le Petit Larousse illustré*. Éditions Larousse.
- Falk, G., Herrmann, F. et Schmid, G. (1983). Energy forms or energy carriers ? *American Journal of Physics*, 51(12), 1074-1077.
- Feynman, R. (1980). *La nature de la physique* (traduit par H. Isaac, J.-M. Lévy-Leblond et F. Balibar). Paris : Seuil.
- Feynman, R., Leighton, R. et Sands, M. (2014). *Le cours de physique de Feynman – Mécanique 2* (traduit par G. Delacôte ; révisé par J. Leroiy ; 3^e éd.). Dunod.
- Feynman, R., Leighton, R. et Sands, M. (2019a). *Le cours de physique de Feynman – Électromagnétisme 1* (traduit par A. Crémieu, M.-L. Duboin et J. Randon-Furling ; révisé par J. Leroiy ; 4^e éd.). Dunod.
- Feynman, R., Leighton, R. et Sands, M. (2019b). *Le cours de physique de Feynman – Électromagnétisme 2* (traduit par A. Crémieu, M.-L. Duboin et J. Randon-Furling ; révisé par J. Leroiy ; 4^e éd.). Dunod.

- Frigg, R. et Hartmann, S. (2020). Models in Science. Dans E. N. Zalta (dir.), *Stanford Encyclopedia of Philosophy*. <https://plato.stanford.edu/entries/models-science/>
- Gaidioz, P., Monneret, A., Tiberghien, A., Bécu-Robinault K., Besson, G., Blache, M.-J., Chastan, J.-M., Clavel, C., Colonna, A.-M., Collet, G., Gibert, D., Longère, G., Le Maréchal, J.-F., Strobel M.-P. et Vagnon, H. (1998) *Introduction à l'énergie. Contenus de l'enseignement et compléments didactiques*. Collection Appliquer le programme. Lyon : Centre Régional de documentation pédagogique de Lyon.
- Gaidioz, P. et Tiberghien, A. (2003). Un outil d'enseignement privilégiant la modélisation. *BUP*, 97, 71-83.
- Genzling, J.-C. (1988). Les modèles particuliers. *Aster*, 7, 53-70.
- Genzling, J.-C. et Pierrard, M.-A. (1994). La modélisation, la description, la conceptualisation, l'explication et la prédiction. Dans C. Larcher et J.-L. Martinand (dir.), *Nouveaux regards sur l'enseignement et l'apprentissage de la modélisation en sciences* (p. 47-78). INRP.
- Givry, D. et Pantidos, P. (2015). Ambiguities in representing the concept of energy: a semiotic approach. *Review of Science, Mathematics and ICT Education*, 9(2), 41-64.
- Guedj, M. et Mayrargue, A. (2014). Éclairages historiques sur l'émergence du concept d'énergie. *RDST*, 10, 35-61.
- Hestenes, D. (2013). Remodeling science education. *European Journal of Science and Mathematics Education*, 1(1), 13-22.
- Hobson, A. (2004). Energy and Work. *The Physics Teacher*, 42, 260.
- de Hosson, C. (2016, 18 janvier). *Conférence sur l'énergie de Cécile de Hosson en vidéo*. [Vidéo en ligne]. Repéré à <https://www.ac-paris.fr/portail/upload/docs/video/mp4/2016-01/energie-dehosson.mp4>
- Kermen, I. (2018). *Enseigner l'évolution des systèmes chimiques au lycée*. Presses universitaires de Rennes.
- Kermen, I. et Barroso, M. T. (2013). Activité ordinaire d'une enseignante de chimie en classe de terminale. *RDST*, 8, 91-114.
- Koliopoulos, D. et Ravanis, K. (1998). L'enseignement de l'énergie au collège vu par les enseignants. Grille d'analyse de leurs conceptions. *Aster*, 26, 165-182.
- Koliopoulos, D. et Ravanis, K. (2000). Élaboration et évaluation du contenu conceptuel d'un curriculum constructiviste concernant l'approche énergétique des phénomènes mécaniques. *Didaskalia*, 16, 33-56.
- Koliopoulos, D. et Tiberghien, A. (1986). Éléments d'une bibliographie concernant l'enseignement de l'énergie au niveau des collèges. *Aster*, 2, 167-178.
- Kruger, C. (1990). Some primary teachers' ideas about energy. *Physics Education*, 25, 86-91.

- Kruger, C., Palacio, D. et Summers, M. (1992). Survey of English primary teachers' conceptions of force, energy and materials. *Science Education*, 76, 339-351.
- Kurnaz, M. A. et Sağlam-Arslan, A. (2009). Using the Anthropological Theory of Didactics in Physics: Characterization of the Teaching Conditions of Energy Concept and the Personal Relations of freshmen to this Concept. *Journal of Turkish Science Education*, 6(1), 72-88.
- Kurnaz, M. A. et Sağlam-Arslan, A. (2011). A Thematic Review of Some Studies Investigating Students' Alternative Conceptions About Energy. *Eurasian Journal of Physics and Chemistry Education*, 3(1), 51-74.
- Lahousse, J. (1906). Conservation et dégradation de l'énergie. *La Houille Blanche*, 11, 246-249.
- Lancor, R. (2014). Using Student-Generated Analogies to Investigate Conceptions of Energy : A multidisciplinary study. *International Journal of Science Education*, 36(1), 1–23.
- Landry, B. (dir.). (2014). *Notions de géologie* (4^e éd.). Modulo.
- Larcher, C. (1994). Étude comparative de démarches de modélisation – Quelles sont les caractéristiques des démarches de modélisation ? Dans Larcher et Martinand (dir.), *Nouveaux regards sur l'enseignement et l'apprentissage de la modélisation en sciences* (p. 9-24). INRP.
- Lee, H.-S. et Liu, O. (2010). Assessing learning progression of energy concepts across middle school grades: the knowledge integration perspective. *Science Education*, 94(4), 665-688. DOI 10.1002/sce.20382
- Lemeignan, G. et Weil-Barais, A. (1992). L'apprentissage de la modélisation dans l'enseignement de l'énergie. Dans J.-L. Martinand (dir.), *Enseignement et apprentissage de la modélisation en sciences* (p.171-231). INRP.
- Lemeignan, G. et Weil-Barais, A. (1993). *Construire des concepts en physique*. Hachette Éducation.
- Liu, X., Ebenezer, J. et Fraser, D. (2002). Structural Characteristics of University Engineering Students' Conceptions of Energy. *Journal of Research in Science Teaching*, 39(5), 423-441.
- Malkoun, L., Vince, J. et Tiberghien, A. (2007). Relations entre pratiques d'enseignement de la physique au lycée et performances des élèves : cas de l'enseignement de la mécanique. (Actes des Cinquièmes rencontres scientifiques de l'ARDiST), 249-256.
- Martinand, J.-L. (1990). Enseignement et apprentissage de la modélisation, Rapport RCP INRP-LIREST. Université Paris 7.
- Martinand, J.-L. (1998). Introduction à la modélisation. Dans G.-L. Baron et A. Durey (dir.), *Les technologies de l'information et de la communication et l'actualisation des enseignements scientifiques et technologiques au lycée d'enseignement général et au collège – université d'été*. INRP – ENS Cachan.
- Martinand, J.-L., Genzling, J.-C., Pierrard, M.-A., Larcher, C., Orange, C., Rumelhard, A., Weil-Barais, A., Lemeignan, G. (1994). *Nouveaux regards sur l'enseignement et l'apprentissage de la modélisation en sciences*. INRP.

- Magnusson, S., Krajcik, J. et Borko, H. (1999). Nature, Sources, and Development of Pedagogical Content Knowledge for Science Teaching. Dans J. Gess-Newsome et N. G. Lederman (dir.), *Examining Pedagogical Content Knowledge* (p.95-132). Springer.
- McIldowie, E. (2004). A trial for two energies. *Physics Education*, 39(2), 212-214
- Megalakaki, O. et Tiberghien, A. (2011). A qualitative approach of modelling activities for the notion of energy. *Electronic Journal of Research in Educational Psychology*, 9(1), 157-182.
- Millar, R. (2005). *Teaching about energy*. (Report). University of York, Department of Educational Studies, York.
- Ministère de l'Éducation Nationale (2008). *Programme d'enseignement des classes de sixième, cinquième, quatrième et troisième de collège*. (Bulletin officiel spécial n°06 du 28 août 2008).
- Ministère de l'Éducation Nationale (2011). *Enseignement intégré de science et technologie – Orientations pour sa mise en œuvre en classe de sixième*. (Bulletin officiel n°26 du 30 juin 2011).
- Ministère de l'Éducation Nationale, de l'Enseignement supérieur et de la Recherche (2015). *Programme d'enseignement du cycle des approfondissements (cycle 4)*. (Bulletin officiel spécial n°11 du 26 novembre 2015).
- Ministère de l'Éducation nationale, de l'Enseignement supérieur et de la Recherche (2016a, mars). *Pistes pour la construction d'une progression sur le thème « L'énergie et ses conversions »*. <https://eduscol.education.fr/document/17770/download>
- Ministère de l'Éducation nationale, de l'Enseignement supérieur et de la Recherche (2016b, mars). *Quel volume de boisson au cola compense les dépenses d'énergie d'un cycliste faisant l'ascension du Mont Ventoux ?* <https://eduscol.education.fr/document/17779/download>
- Ministère de l'Éducation nationale, de l'Enseignement supérieur et de la Recherche (2016c, mars). *Quelle bouilloire choisis-tu ? Pourquoi ?* <https://eduscol.education.fr/document/17773/download>
- Ministère de l'Éducation nationale, de l'Enseignement supérieur et de la Recherche (2016d, mars). *Repères pour l'enseignement de la physique-chimie au cycle 4*. <https://eduscol.education.fr/document/17722/download>
- Ministère de l'Éducation nationale, de l'Enseignement supérieur et de la Recherche (2016e, mars). *Sur un circuit automobile, quelle voiture pourra atteindre la vitesse de 320 km/h avant la moto ?* <https://eduscol.education.fr/document/17776/download>
- Ministère de l'Éducation nationale, de l'Enseignement supérieur et de la Recherche (2016f, juin). *Aide à la construction d'une progression en physique - chimie au cycle 4*. <https://eduscol.education.fr/document/17731/download>
- Morge L. et Buty, C. (2014). L'énergie : vers des recherches plurididactiques. *RDST*, 10, 9-34.

- Morge, L. et Doly, A.-M. (2013). L'enseignement de la notion de modèle. *Spirale. Revue de recherches en éducation*, 52, 177-214.
- Neumann, K., Viering, T., Boone, W. J. et Fischer, H. E. (2013). Towards a learning progression of energy. *Journal of Research in Science Teaching*, 50(2), 162-188.
- Orange, C. (1994). Les modèles de la mise en relation au fonctionnement. Dans C. Larcher et J.-L. Martinand (dir.), *Nouveaux regards sur l'enseignement et l'apprentissage de la modélisation en sciences* (p. 9-24). INRP.
- Pérez, J.-P., Carles, R. et Fleckinger, R. (2019). *Électromagnétisme – Fondements et applications*. (4^e éd.). Dunod.
- Pérez, J.-P. et Pérez, A.-M. (1994). Quelques remarques et commentaires sur l'enseignement de l'énergie. *BUP*, 88(768), 695-701.
- Pintó, R., Couso, D. et Gutierrez, R. (2005). Using research on teachers' transformations of innovations to inform teacher education. The case of energy degradation. *Science Education*, 89, 38-55.
- Pujol, O. (2009, 26 octobre). *L'énergie en physique* [communication orale]. 57^e congrès de l'Union des Professeurs de Physique et de Chimie, Toulouse.
- Pujol, O. (2018). Commentaire sur le terme « transfert thermique » en thermodynamique. *BUP*, 112(1004), 695-701.
- Pujol, O. (2022). Le rayonnement dans les bilans énergétiques d'un système : travail, chaleur, ou autre chose ? *BUP*, 116(1045), 601-610.
- Prigogine, I. et Kondepudi, D. (1999). *Thermodynamique – des moteurs thermiques aux structures dissipatives* (traduit par S. Pahaut). Odile Jacob.
- Raven, P. H., Johnson, G.B., Mason, K. A., Losos, J. B. et Ducan, T. (2020). *Biologie* (traduit par P. L. Masson et C. Van Hove; 12^e éd. révisée par R. Forêt). De Boeck Supérieur.
- Reece, J., Urry, L., Cain, M., Wasserman, S., Minorsky, P. et Jackson, R. (2012). *Campbell biologie* (adapté par J. Faucher et R. Lachaîne, 9^e éd.). Pearson.
- Renard, M., Lagabrielle, Y., Martin, E. et de Rafélis, M. (2018). *Éléments de géologie* (16^e éd.). Dunod.
- Robert, A. (2007). Stabilité des pratiques des enseignants de mathématiques (second degré) : une hypothèse, des inférences en formation. *Recherches en Didactique des Mathématiques*, 27(3), 271-312.
- Robert, A. (2008). La double approche didactique et ergonomique pour l'analyse des pratiques d'enseignants de mathématiques. Dans F. Vandebrouck (dir.), *La classe de mathématiques : activités des élèves et pratiques des enseignants* (p.59-68). Octarès.

- Robert, A. et Rogalski, J. (2002). Le système complexe et cohérent des pratiques des enseignants de mathématiques : Une double approche. *Canadian Journal of Science, Mathematics and Technology Education*, 2(4), 505-528.
- Roche, J. (2003). What is potential energy? *European Journal of Physics*, 24, 185-196.
- Scherr, R., Close, H. G., McKagan, S. B. et Vokos, S. (2012). Representing energy. I. Representing a substance ontology for energy. *Physical Review Special Topics - Physics Education Research*, 8(2), 020114.
- Shulman, L. S. (1986). Those two understand: Knowledge growth in teaching. *Educational Researcher*, 15(2), 4-14.
- Shulman, L. S. (1987). Knowledge and teaching: Foundations of the new reform. *Harvard Educational Review*, 57(1), 1-22.
- Shulman, L. S. (2007). Ceux qui comprennent – le développement de la connaissance dans l’enseignement. *Éducation et didactique*, 1, 97-114.
- Shulman, L. S. (2015). PCK: Its genesis and exodus. Dans A. Berry, P. Friedrichsen et J. Loughran (dir.), *Re-Examining Pedagogical Content Knowledge in Science Education* (p.3-13). Routledge.
- Slimi, J. (2019). Effets d’une formation en démarche d’investigation sur les pratiques enseignantes : cas des enseignants tunisiens de physique. (Thèse de doctorat). Université de Bretagne Occidentale, France ; Université virtuelle de Tunis, Tunisie.
- Soler, L. (2013). Qu’est-ce qu’un modèle scientifique ? Des caractéristiques du modèle qui importent du point de vue de l’enseignement intégré de science et de technologie. *Spirale. Revue de recherches en éducation*, 52, 177-214.
- Sensevy, G., Tiberghien, A., Santini, J., Laubé, S. et Griggs, P. (2008). An epistemological approach to modeling: Cases studies and implications for science teaching. *Science Education*, 92(3), 424-446.
- Simon, Y. (1979). *Énergie et entropie*. Armand Colin.
- Solomon, J. (1985). Teaching the conservation of energy. *Physics Education*, 20, 165-170.
- Taber, K. (1989). Energy – by many other names. *School Science Review*, 70(252), 57–62.
- Tang, M. D. (2014). Une étude didactique des praxéologies de la représentation en perspective dans la géométrie de l’espace, en France et au Viêt-Nam. (Thèse de doctorat). Université de Grenoble, France.
- Tatar, E. et Oktay, M. (2007). Students’ misunderstandings about the energy conservation principle: a general view to studies in literature. *International Journal of Environmental et Science Education*, 2(3), 79-81.
- Tiberghien, A. (1994). Modeling as a basis for analyzing teaching – learning situations. *Learning and Instruction*, 4, 71-87.
- Tiberghien, A. et Malkoun, L. (2007). Différenciation des pratiques d’enseignement et acquisitions des élèves du point de vue du savoir. *Éducation et didactique*, 1(1), 29-54.

- Tiberghien, A. et Vince, J. (2005). Études de l'activité des élèves de lycée en situation d'enseignement de la physique. *Cahiers du français contemporain*, 10, 153-176.
- Trellu, J.-L. et Toussaint, J. (1986). La conservation, un grand principe. *Aster*, 2, 83-87.
- Trumper, R. (1990). Being constructive: An alternative approach to the teaching of the energy concept - Part one. *International Journal of Science Education*, 12, 343-354.
- Trumper, R. (1998). A longitudinal study of physics students' conceptions on energy in pre-service training for high school teachers. *International Journal of Science Education and Technology*, 7, 311-318.
- Trumper, R., Raviolo, A. et Shnersch, A. M. (2000). A cross-cultural survey of conceptions of energy among elementary school teachers in training – empirical results from Israel and Argentina. *Teaching and Teacher Education*, 16, 697-714.
- Varenne, F. (2013). *Théories, réalités, modèles*. Éditions matériologiques.
- Veillard, L., Tiberghien, A. et Vince, J. (2011). Analyse d'une activité de conception collaborative de ressources pour l'enseignement de la physique et la formation des professeurs. *Activités*, 8(2), 202-227.
- Viennot, L. (1993). Temps et causalité dans les raisonnements des étudiants en physique. *Didaskalia*, 1, 13-27.
- Viennot, L. (1996). *Raisonnement en physique*. De Boeck Université.
- Viennot, L. (2013). Les promesses de l'enseignement intégré de science et technologie (EIST) : de la « fausse monnaie » ? *Spirale. Revue de recherches en éducation*, 52, 51-68.
- Vince, J. et Tiberghien, A. (2012). Enseigner l'énergie en physique à partir de la question sociale du défi énergétique. *Review of Science, Mathematics and ICT Education*, 6(1), 89-124.
- Vince, J. et Tiberghien, A. (2015). Pourquoi n'est-il pas pertinent de faire de l'énergie électrique un concept de physique dans un programme d'enseignement ? *BUP*, 976(109), 1103-1109.
- Walliser, B. (1977). *Systèmes et modèles*. Seuil.
- Warren, J. W. (1986). At what stage should energy be taught ? *Physics Education*, 21, 152-154.
- Watts, D. M. (1983). Some alternative views of energy. *Physics Education*, 18(5), 213-217.