



**HAL**  
open science

# Enseigner et apprendre la transformation chimique pour comprendre le cycle du carbone. Vers une approche codisciplinaire du réchauffement climatique

Marie Sudriès

## ► To cite this version:

Marie Sudriès. Enseigner et apprendre la transformation chimique pour comprendre le cycle du carbone. Vers une approche codisciplinaire du réchauffement climatique. Education. Université de Montpellier; Université de Genève, 2024. Français. ⟨NNT : ⟩. ⟨tel-04867622⟩

**HAL Id: tel-04867622**

**<https://hal.science/tel-04867622v1>**

Submitted on 14 Jan 2025

**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.



HAL Authorization



**UNIVERSITÉ  
DE GENÈVE**

FACULTÉ DE PSYCHOLOGIE  
ET DES SCIENCES DE L'ÉDUCATION



**UNIVERSITÉ DE  
MONTPELLIER**

Section de Sciences de l'éducation

Sous la co-direction de Florence Ligozat et David Cross

---

# **Enseigner et apprendre la transformation chimique pour comprendre le cycle du carbone. Vers une approche codisciplinaire du réchauffement climatique**

## **THÈSE EN COTUTELLE**

Présentée à la  
Faculté de psychologie et des sciences de l'éducation  
de l'Université de Genève  
et à l'Université de Montpellier  
pour obtenir le grade de Docteur en Sciences de l'éducation

par

Marie SUDRIÈS

de

France

Thèse No 892

GENÈVE

29 novembre 2024

No étudiant : 19-300-3018

**Enseigner et apprendre la transformation chimique pour comprendre  
le cycle du carbone. Vers une approche codisciplinaire  
du réchauffement climatique**

**THÈSE EN COTUTELLE**

Présentée à la  
Faculté de psychologie et des sciences de l'éducation  
de l'Université de Genève  
et à l'Université de Montpellier  
pour obtenir le grade de Docteur en Sciences de l'éducation

par

Marie SUDRIÈS

**Membres du jury :**

Nicolas HERVÉ, Professeur des universités, Université de Toulouse Jean Jaurès	rapporteur
Isabelle KERMEN, Professeure des universités, Université de Bretagne Occidentale	rapporteuse
Yann LHOSTE, Professeur des universités, Université des Antilles	examineur
Isabelle MILI, Professeure honoraire, FAPSE, Université de Genève	examinatrice
Olivier MORIN, Maître de conférences, Université de Lyon 1	examineur
Valérie MUNIER, Professeure des universités, Université de Montpellier	examinatrice
David CROSS, Maître de conférences HDR, Université de Montpellier	co-directeur
Florence LIGOZAT, Professeure associée, FPSE, Université de Genève	co-directrice

## *Résumé*

Cette thèse propose d'interroger les conditions d'enseignement-apprentissage du concept de transformation chimique par des élèves de 13-15 ans.

Ce concept, présent au cœur des enseignements de chimie dès le secondaire I en France et en Suisse romande, participe à la compréhension de nombreux processus naturels et techniques présents dans le cycle du carbone, qui sont au cœur de la compréhension de problèmes environnementaux, tels que le réchauffement climatique.

Au-delà de l'enseignement-apprentissage du concept de transformation chimique dans le cadre strictement disciplinaire de la chimie, il s'agit donc de comprendre comment ce concept peut trouver une signification plus large, à même de soutenir l'étude d'autres objets de savoirs qui sont traditionnellement pris en charge par les sciences de la vie et de la Terre en France, la biologie et la géographie dans le canton de Genève (Suisse). L'objectif est de considérer les relations de codisciplinarité qui concernent les objets de savoir de la chimie dans l'enseignement scolaire.

Nous menons une étude des pratiques grâce à une enquête par questionnaire, puis à travers quatre études de cas (deux en France, deux dans le canton de Genève). La méthodologie de recueil de données s'organise sur deux années consécutives. Au cours de la première année, nous observons les pratiques ordinaires d'enseignement du concept de transformation chimique. L'année suivante, nous proposons aux mêmes enseignantes et enseignants d'intégrer le cycle du carbone à leur séquence ordinaire. Les données sont analysées grâce aux outils du modèle de l'action didactique conjointe (triplet de genèses).

Nos résultats permettent d'établir des indicateurs de codisciplinarité qui nous renseignent sur la collaboration des disciplines scolaires dans l'étude d'un problème complexe en classe de chimie (le réchauffement climatique). Nous discutons également le potentiel et les limites d'une telle séquence codisciplinaire dans le cadre des enseignements de chimie au secondaire, en particulier du point de vue des apprentissages des élèves sur le plan des contenus scientifiques, comme de leur formation citoyenne.

## *Mots-clefs*

Transformation chimique, cycle du carbone, codisciplinarité, problème complexe, réchauffement climatique, enseignement de la chimie, secondaire I

### *Abstract*

The aim of this study is to investigate the conditions under which the chemical transformation concept is taught and learned. The chemical transformation is a central concept of the chemistry curriculum in French-speaking contexts (France and Western-Switzerland) and it can be a key to understand natural/technical phenomenon like the carbon cycle. Thus, this concept is needed to understand complex issues like global warming.

The purpose of this work is to explore the potential of the carbon cycle for teaching an environmental issue through chemistry lessons at the lower secondary school (13- to 15-year-old students). This approach is called “codisciplinary”. In French-speaking countries, the curriculum is organised into school disciplines, taught during distinctive time slots by specialised teachers at secondary level. Such an organisation questions the teachability of topics such as environmental issues and sustainable development.

The carbon cycle is a common model in biology and geology: its structure in circle allows connecting human activities and their environmental consequences. From a chemical point of view, each arrow on the cycle could be modelled as a chemical reaction (photosynthesis, respiration, combustion, etc.). From our perspective, the integration of the carbon cycle in chemistry teaching could create the conditions for a codisciplinary approach.

We study teaching practices by a questionnaire survey and, then by classroom observations. Four chemistry teachers participated in the study (two in each French-speaking context: Montpellier area in France, Geneva District in Western-Switzerland). The data were collected for two consecutive years. The first year, we video-recorded the ordinary teaching practices. The second year we suggested to the teachers to integrate the carbon cycle into their teaching of the chemical reaction. The resulting teaching was also video-recorded.

On the basis of our results, we build codisciplinarity indicators. In other words, how chemistry’s specific concepts chemical reaction and the principle of conservation of the matter — in relation to carbon cycle and greenhouse effect models deepen the understanding of global warming. Also, we discuss the effect on students’ learning. On the one hand, about chemistry concepts learning, on the other hand about understanding the Anthropocene.

### *Keywords*

Chemical Change, Carbon Cycle, Codisciplinarity, Complex Issue, Global Warming, Anthropocene, Chemistry Education, Lower Secondary School

## *Remerciements*

Si la rédaction d'une thèse est un processus des plus solitaires, celui-ci ne peut aboutir sans le concours de différents soutiens scientifiques, professionnels et amicaux. Je tiens à remercier ici les personnes qui, de près ou de loin, m'ont apporté ce soutien pendant les cinq années qui viennent de s'écouler.

Tout d'abord, merci à Nicolas Hervé et Isabelle Kermen d'avoir accepté les rôles de rapporteur et rapportrice de la thèse.

Merci à Yann Lhoste, Isabelle Mili, Olivier Morin et Valérie Munier de constituer les membres du jury.

Un grand merci à ma direction de thèse, qui m'a accompagnée dans l'élaboration de mon projet de thèse, dans sa réalisation et dans la délicate période de l'écriture du manuscrit.

Florence, merci de m'avoir accueillie au sein du GREDIC en octobre 2019. Merci de m'avoir accompagnée, au sens propre et au sens figuré, dans tous les projets scientifiques qui ont jalonné ces cinq années. Les opportunités de recherche, d'enseignement et de communication — en particulier à l'international — que tu m'as offertes ont été décisives pour former la jeune chercheuse et l'enseignante que je suis aujourd'hui. Merci pour ta confiance, merci pour ton suivi, merci pour ta rigueur scientifique, qui ont contribué à me faire grandir.

David, je n'oublie pas que tout a commencé un jour d'octobre 2017 où j'ai franchi la porte de ton bureau pour te demander d'encadrer mon TER de M1. Merci de m'avoir suivie dans toutes mes aventures depuis. Merci pour la constance de ton encadrement malgré la distance géographique. Merci de me pousser hors de ma zone de confort quand cela était nécessaire. Merci pour la richesse de nos discussions scientifiques. Merci pour ton amitié.

Merci aux membres de mon Comité de suivi de thèse et de ma Commission de thèse, Manuel Bächtold, Yann Lhoste, Isabelle Mili et Didier Perret pour les rendez-vous annuels en ligne et à Genève. Merci pour vos commentaires justes et appréciés.

Merci à Aurélie, Gauthier, Nino et Henri qui se reconnaîtront sous leurs pseudonymes et qui m'ont ouvert les portes de leurs classes (sans oublier leurs élèves ainsi que leurs collègues de SVT qui se sont prêtées au jeu de l'entretien). Dévoiler ses pratiques d'enseignement n'est pas un exercice aisé, surtout lorsqu'une caméra vous observe. Merci de m'avoir fait confiance, merci de ne pas avoir compté vos heures, merci d'avoir toujours répondu à mes questions avec précision. Sans votre aide, cette thèse n'aurait pas été possible.

Merci aussi aux enseignantes et enseignants du groupe IRES de l'Université de Montpellier avec qui je continue à collaborer bien au-delà du cadre de ma thèse. Nos rencontres sont toujours pour moi une source de réflexion et d'entrain, merci pour cela.

Merci également à mes collègues du GREDIC, du feu SR-DIC, du jeune groupe DICAMEP et du LIRDEF qui m'ont écoutée, relue et conseillée aux différentes étapes de mon doctorat. Merci à Valérie Munier pour la précieuse relecture de mon questionnaire. Merci à Corinne Marlot pour les conversations éclairantes sur le plan professionnel comme personnel. Merci à Aurélie Chesnais pour le prêt de livre essentiel dans les dernières semaines d'écriture.

Merci aux doctorantes et doctorants qui ont fait un bout de parcours de thèse avec moi. Merci à celles et ceux qui ont ouvert la voie en me précédant dans l'exercice de la soutenance. Un merci tout particulier à celles qui sont devenues des amies et qui poursuivent leur chemin à mes côtés.

Merci à mes amies et à mes amis donc — celles qui le sont devenues, celles et ceux qui le sont restés — pour les moments « à côté de la thèse » indispensables. Merci aux Montpelliéraines et aux Montpelliérains dont la chambre d'amis (le donjon ! la véranda ! la piscine !) est devenue une « pièce à moi » pendant les nombreux déplacements qu'a impliqués la cotutelle internationale : Maëlle, Capucine, Sylvain, David et Claire, merci. Merci à Florence de m'avoir tenu compagnie pendant l'été du bouclage du manuscrit.

Merci à ma famille, en particulier à mes cousines et à ma marraine, pour votre soutien toujours renouvelé. Merci à mon cousin JC de m'avoir accompagnée dans l'expérience d'expatriation genevoise.

Enfin, merci à mes très, très proches, Odile et Yves, Léo, Paul et Mathilde. Merci d'être toujours là, au bout du fil, sur le quai de la gare, aux quatre coins de la France, et même jusqu'en Suisse ! Merci pour les messages ensoleillés du vendredi matin, merci pour l'assistance informatique et technique en dehors des jours ouvrés, merci pour la livraison surprise de marrons glacés au moment opportun, merci pour votre patience, merci pour votre confiance. Je vous dois beaucoup.

*Pour Gaël*  
*À Louis*

## Table des matières

### Première partie : contextualisation

Chapitre 1 — Introduction : aux origines du questionnement.....	14
1.1 L'enseignement de la chimie au début du secondaire .....	14
1.2 Enseigner les problèmes environnementaux à l'école.....	14
1.2.1 Des problèmes environnementaux : réchauffement climatique et anthropocène .....	14
1.2.2 L'enseignement des problèmes environnementaux au sein des disciplines scientifiques scolaires .....	15
1.3 Une étude de la transposition didactique.....	16
1.4 Plan du manuscrit .....	17
Chapitre 2 — Étude d'un objet de savoir spécifique : la transformation chimique.....	19
2.1 La transformation chimique dans les recherches en didactique .....	19
2.1.1 Méthodologie de la revue de littérature internationale .....	20
2.1.2 Présentation du corpus.....	23
2.1.3 Évolution des sujets des publications à travers le temps .....	26
2.2 Le modèle épistémologique d'Isabelle Kermen .....	31
2.2.1 Ancrage dans les travaux d'épistémologie de la chimie.....	31
2.2.2 Deux cadres pour la modélisation en sciences et leurs déclinaisons en chimie.....	33
2.2.3 Spécificités du modèle épistémologique de la transformation chimique au lycée .....	35
2.3 Analyse épistémologique : ce que la transformation chimique permet de comprendre au début du secondaire.....	39
2.3.1 Modéliser la transformation chimique au secondaire I : vers un modèle épistémologique des savoirs .....	39
2.3.2 Un exemple de transformation chimique étudié au secondaire I : la combustion du carbone 42	
2.3.3 Le potentiel de la transformation chimique pour enseigner les problèmes environnementaux .....	43
2.4 Conclusion du chapitre.....	43
Chapitre 3 — L'insertion des problèmes environnementaux dans l'enseignement de la chimie .....	45
3.1 À propos des curricula.....	45
3.1.1 Curricula de sciences .....	45
3.1.2 Curricula de chimie .....	49
3.2 Au niveau des pratiques .....	59

3.2.1	Études sur le positionnement des sujets enseignants vis-à-vis des intentions des curricula	59
3.2.2	Une étude des pratiques par entretiens en Allemagne .....	59
3.2.3	Une étude des pratiques par questionnaire en France.....	60
3.3	Conclusion du chapitre.....	68
Chapitre 4	— Notre proposition : la codisciplinarité pour aborder un problème complexe .....	71
4.1	Les limites des approches a-/inter-/pluri-/transdisciplinaires pour enseigner les questions environnementales.....	71
4.1.1	Des concepts travaillés en sciences humaines et sociales.....	71
4.1.2	Le point de vue des approches disciplinaires.....	72
4.1.3	Le point de vue de l'approche interdisciplinaire .....	72
4.1.4	L'interdisciplinarité dans les textes officiels francophones .....	74
4.1.5	Le cas des « Éducatifs à... » .....	76
4.2	La codisciplinarité au sens de Chevallard (2004).....	79
4.3	Un objet complexe : le cycle du carbone.....	81
4.3.1	Un modèle biogéochimique.....	81
4.3.2	Un objet-frontière ?.....	85
4.3.3	Le concept d'objet-relais : vers une matrice problématique.....	87
4.3.4	Le potentiel codisciplinaire du cycle du carbone.....	88
4.3.5	Le cycle du carbone pour aborder l'origine anthropique du changement climatique.....	92
4.4	Conclusion du chapitre.....	95
Chapitre 5	— Les outils conceptuels de la didactique comparée .....	97
5.1	Comparatisme en didactique : distinguer le générique du spécifique .....	97
5.2	Système didactique et transposition didactique.....	99
5.2.1	Le système didactique .....	99
5.2.2	La transposition didactique.....	100
5.3	Situations, contrat didactique et milieu .....	103
5.3.1	Le contrat didactique .....	103
5.3.2	Le milieu didactique .....	104
5.4	Institution, rapports aux objets et mésogenèse .....	105
5.4.1	Le milieu chez Chevallard et les rapports personnels et institutionnels aux objets.....	105
5.4.2	Rapports public et privé aux objets d'un sujet dans le cadre d'une institution.....	105
5.5	Le modèle de l'action didactique conjointe.....	106
5.5.1	Une analyse ascendante de la transposition didactique .....	106

5.5.2	La distinction tâche-situation.....	107
5.5.3	Le doublet contrat didactique-milieu.....	107
5.5.4	Le quadruplet de descripteurs des structures fondamentales de l'action conjointe .....	108
5.5.5	Le triplet de genèses .....	109
5.6	Outils complémentaires.....	110
5.6.1	Niveaux de codétermination didactique .....	110
5.6.2	Déterminants de l'action conjointe.....	111
5.6.3	Les rapports aux savoirs dans une perspective sociologique.....	113
5.6.4	Le cadre des configurations didactiques.....	115
5.7	Conclusion du chapitre.....	116
Chapitre 6 — Problématique.....		118
Chapitre 7 — Recueil de données selon une approche clinique/expérimentale du didactique ordinaire		122
7.1	À propos de la démarche clinique/expérimentale .....	122
7.2	L'observation des pratiques ordinaires .....	122
7.3	Implanter une greffe dans le système didactique.....	125
7.3.1	Le principe de greffe pour étudier le fonctionnement du système didactique .....	125
7.3.2	Notre greffe : le cycle du carbone pour enseigner la transformation chimique .....	126
7.4	Bilan du dispositif de recueil des données .....	130
Chapitre 8 — Outils d'analyse des données.....		132
8.1	Analyser des données vidéos pour l'étude de l'action conjointe.....	132
8.1.1	Trois échelles d'analyse.....	132
8.1.2	Réduction de l'information.....	133
8.1.3	Une analyse ascendante de la transposition didactique .....	137
8.1.4	Outils complémentaires pour l'étude des traces .....	138
8.2	Bilan de la méthodologie d'analyses.....	143
Chapitre 9 — Étude de l'évolution des systèmes didactiques sous l'influence du cycle du carbone .		146
9.1	Analyses à l'échelle macro : le contrat didactique dans sa dimension pilotée par le sujet enseignant.....	146
9.1.1	Le cas d'Aurélie.....	146
9.1.2	Le cas de Nino .....	151
9.1.3	Le cas de Gauthier .....	155
9.1.4	Le cas d'Henri .....	162

9.2	Analyses aux échelles méso et micro : deux exemples d'émergence de la codisciplinarité dans la restructuration des séquences .....	167
9.2.1	Nino : un exemple de l'évolution de la fonction du modèle de la réaction chimique ...	167
9.2.2	Gauthier : quand le cycle du carbone permet l'étude d'un problème complexe.....	180
9.3	Conclusion du chapitre : le cycle du carbone au service de l'étude de la complexité.....	195
Chapitre 10 — Étude à l'échelle micro de la mise en œuvre de séquences articulant cycle du carbone et modèle de la réaction chimique .....		199
10.1	Construction d'indicateurs de codisciplinarité à l'échelle micro .....	199
10.2	Étude de la relation contrat didactique-milieu des extraits à potentiel codisciplinaire : vers un modèle de la codisciplinarité.....	200
10.2.1	Gauthier : un exemple d'évolution vers la codisciplinarité.....	200
10.2.2	Aurélie et Nino : deux exemples de gestion difficile de la codisciplinarité .....	221
10.2.3	Henri et Aurélie : quand le sujet enseignant surplombe la situation .....	247
10.3	Conclusion du chapitre.....	271
10.3.1	Vers un modèle générique de la codisciplinarité dans l'enseignement secondaire ...	271
10.3.2	Conditions de mise en œuvre de la codisciplinarité et apprentissages des élèves.....	273
Chapitre 11 — Discussion et perspectives.....		277
11.1	Mise en évidence d'une diversité de pratiques à partir de déclarations et d'observations en situation .....	277
11.2	Retour sur la définition de la codisciplinarité .....	278
11.3	La codisciplinarité au service de l'étude d'un problème complexe : un parcours d'obstacles 280	
11.3.1	Retour réflexif sur la méthodologie de la greffe .....	280
11.3.2	Contraintes institutionnelles.....	285
11.3.3	Considérations épistémologiques.....	286
11.4	Une double approche didactique de la chimie/didactique comparée .....	288
11.5	Conclusion du chapitre.....	288
Chapitre 12 — Conclusion et ouverture .....		289
Bibliographie.....		293
Table des extraits.....		332
Table des figures.....		333
Table des tableaux .....		337

Notre personnage gît donc depuis des centaines de millions d'années, combiné avec trois atomes d'oxygène et un atome de calcium, sous forme de roche calcaire ; il a déjà derrière lui une très longue histoire cosmique, mais nous l'ignorons. [...]

Mais pour la bonne fortune du conteur, justement, qui, dans le cas contraire aurait fini de conter, le banc calcaire dont l'atome fait partie gît en surface. Il est à la portée de l'homme et de son pic (honneur au pic et à ses équivalents les plus modernes, ils sont encore ses intermédiaires les plus importants dans le dialogue millénaire entre les éléments et l'homme) : à un moment quelconque que moi, le narrateur, décide être un moment de l'année 1840, un coup de pic le détacha et lui fit prendre le chemin du four à chaux, le précipitant dans le monde des choses qui changent. On le chauffa afin de le séparer du calcium, lequel resta pour ainsi dire les pieds sur terre et alla à la rencontre d'un destin moins brillant que nous ne raconterons pas ; lui, toujours solidement accroché à deux des trois atomes d'oxygène, ses anciens compagnons, sortit par la cheminée et pris la voie des airs. Son histoire, d'immobile qu'elle était, devint tumultueuse. Il fut saisi par le vent, rabattu au sol, emporté dix kilomètres plus loin. Il fut respiré par un faucon, descendit dans ses poumons haletants, mais il ne pénétra pas son sang riche et fût expulsé. À trois reprises, il se dissolut dans l'eau d'un torrent et il fut encore expulsé. Il voyagea ensuite avec le vent pendant huit années, volant tantôt haut, tantôt bas, au-dessus de la mer et parmi les nuages, au-dessus des forêts et d'étendues de glace sans fin, puis il fut pris dans le piège et dans l'aventure organique.

Primo Lévi, extrait de « Carbone », dans *Le Système Périodique*<sup>1</sup>

Ce grand récit pourrait aussi donner ce conte pour enfants aux résonances mythiques : l'Homme (toujours avec un grand H) voulant dominer le monde a libéré le carbone que la Nature (grand N), dans sa grande sagesse, gardait enfoui dans les entrailles de la terre, sous forme de charbon et de pétrole. Ces carburants, matières organiques fossilisées, sont de la durée concentrée, du temps congelé, immobilisé. Or ce capital lentement amassé, qui gisait à l'abri des convoitises, est un diable que l'Homme a sorti de sa boîte, de sous terre, pour le répandre dans l'atmosphère. Comment le faire rentrer dans sa boîte sous terre, comment le séquestrer pour respirer à nouveau ? Tel est le nœud du récit qui s'écrit au fil des réunions et autres conventions de lutte contre le réchauffement climatique.

Bernadette Bensaude-Vincent, extrait de *Temps-paysage*<sup>2</sup>

---

<sup>1</sup> Lévi (1975, p. 244-245).

<sup>2</sup> Bensaude-Vincent (2021, p. 132).

## **PREMIÈRE PARTIE : CONTEXTUALISATION**

## CHAPITRE 1 — INTRODUCTION : AUX ORIGINES DU QUESTIONNEMENT

### 1.1 L'enseignement de la chimie au début du secondaire

L'enseignement de la chimie se structure autour de la modélisation de phénomènes expérimentaux à deux niveaux : le macroscopique et le microscopique (Kermen, 2018). Ainsi, les premiers enseignements de la discipline consistent à interpréter certaines transformations de la matière (les transformations chimiques) comme des réactions chimiques, c'est-à-dire comme la réaction de deux espèces chimiques conduisant à la formation de nouvelles espèces (niveau macroscopique). Au niveau microscopique du modèle, à ce niveau de l'enseignement scolaire, la réaction chimique est considérée comme un réarrangement d'atomes. Le principe de conservation de la matière est illustré expérimentalement par celui de la masse et interprété au niveau du modèle microscopique par la conservation des atomes au cours de la réaction.

Ainsi, l'enseignement de la chimie au début du secondaire consiste en la transmission de savoirs disciplinaires nécessaires pour modéliser les phénomènes de transformations de la matière. Pourtant, les instances internationales demandent aux disciplines scientifiques scolaires de contribuer à la formation des citoyens et citoyennes au même titre que celle des scientifiques de demain (Brandt-Pomares & Lhoste, 2013; Chauvigné & Fabre, 2021). Cette dimension d'éducation confiée à l'École s'illustre dans les enseignements scientifiques à travers la transmission d'une culture scientifique et technique (CST) qui permet à chacun et chacune de comprendre le monde et d'exercer une citoyenneté éclairée. L'École doit alors prendre en charge l'étude des grands enjeux de notre siècle. Les problèmes environnementaux en sont l'exemple le plus saillant.

À l'instar des autres disciplines scientifiques scolaires, la chimie est à même de prendre en charge les problèmes environnementaux, car elle offre un ensemble de concepts et de modèles qui permettent d'en comprendre les enjeux, de les expliquer et de participer à leur résolution.

Par exemple le modèle des combustions, savoir central des curricula de chimie au début du secondaire est nécessaire pour interpréter le rôle des sociétés industrielles (au sens de Lévi-Strauss, 2011) dans l'accumulation du dioxyde de carbone dans l'atmosphère, et donc pour comprendre l'origine anthropique du réchauffement climatique. C'est pourquoi notre travail s'intéresse à la contribution de la discipline scolaire « chimie » à la formation citoyenne, en particulier à travers le prisme de l'enseignement du modèle de la réaction chimique, savoir central des curricula.

### 1.2 Enseigner les problèmes environnementaux à l'école

#### 1.2.1 Des problèmes environnementaux : réchauffement climatique et anthropocène

À travers l'expression « problèmes environnementaux », nous désignons les effets négatifs des activités humaines, domestiques et industrielles, sur l'environnement au sens institutionnel du terme, à savoir : « l'ensemble des éléments qui, dans la complexité de leurs relations, constitue le cadre, le milieu, les conditions de vie pour l'homme<sup>3</sup> » (MEN, 2004). En référence aux effets des activités industrielles sur le climat, Crutzen et Stoemer introduisent au début des années deux mille l'idée d'une nouvelle ère géologique : « l'Anthropocène » (Crutzen & Stoermer, 2021). Ce concept fait encore débat dans le

---

<sup>3</sup> Comprendre « des humains ».

domaine de la géologie (Barthes et al., 2023; Bensaude-Vincent, 2021), en particulier vis-à-vis de la délimitation d'une telle ère dans le temps. À ce propos, Bensaude-Vincent (2021) considère que « la datation de l'Anthropocène vire fatalement à la recherche d'un responsable » (p. 138). De notre point de vue, l'étude des problèmes environnementaux dans le cadre des enseignements scolaires contribue à la compréhension de leur origine. Aussi, c'est à cette dimension, et à cette dimension uniquement, que nous faisons référence si nous sommes amenée à employer le terme « anthropocène » dans le présent travail. Ainsi, dans notre usage, le concept doit être entendu comme synonyme de « l'origine anthropique du réchauffement climatique », et ne convoque en aucune façon les controverses qui animent actuellement la communauté des géologues.

Nous considérons les problèmes environnementaux comme des problèmes *complexes* (au sens de Morin, 1982), c'est-à-dire que leur compréhension mobilise le croisement de différentes perspectives disciplinaires. En effet, la complexité telle que définie par Morin (1982) peut s'illustrer à travers la métaphore d'une étoffe arborant des motifs colorés. Pour cet auteur, chaque discipline pourrait être représentée par un fil de couleur contribuant à l'élaboration du motif : le problème complexe. Avec cette métaphore, Morin (1982) évoque l'origine latine du mot « complexe » : *complexus*, qui signifie « tisser ensemble » (p. 175).

Du fait de leur dimension complexe et parce qu'ils sous-tendent des systèmes de valeurs sans cesse en évolution (Martinand, 2016), les problèmes environnementaux interrogent l'ensemble de la société, en particulier les communautés scientifiques et l'éducation (Lange & Barthes, 2021).

Pour Fabre (2011), l'éducation doit contribuer à outiller les élèves pour qu'elles et ils puissent s'orienter dans un monde problématique. Il identifie la problématisation comme l'un de ces outils, constituant la boussole de celui ou celle qui la prend en main :

La boussole n'impose pas de direction, elle polarise seulement l'espace pour que le voyageur puisse déterminer une direction, sa direction. Elle implique cependant un repère de localisation, un point d'origine (où suis-je ?) et trace des axes ou des points cardinaux. (p. 108)

Sur cette boussole, le processus de problématisation s'illustre entre les points cardinaux. D'ouest en est s'organise la trajectoire entre le problème et sa solution ; du nord au sud sont agencées les données et les conditions du problème. Ces éléments nous permettent de compléter la définition des problèmes environnementaux introduite précédemment. À la lumière des travaux de Fabre (2011), « problème » peut s'entendre comme une difficulté, un événement négatif, mais désormais aussi comme un problème à élaborer et à résoudre, dans le sens de la problématisation.

1.2.2 L'enseignement des problèmes environnementaux au sein des disciplines scientifiques scolaires  
Au tournant des années deux mille, sous l'impulsion du plan « Science and Technology Literacy for All » de l'UNESCO (1994), l'enseignement scientifique connaît un certain nombre de mutations. Sur un plan institutionnel, ceci se traduit en France, quelques années plus tard, par la Stratégie nationale de culture scientifique, technique et industrielle (Ministère de l'Éducation nationale, de l'enseignement supérieur et de la recherche & Ministère de la Culture et de la Communication, 2017) qui institutionnalise les sciences, la technologie et l'industrie au rang de la culture générale. Dans les pays nord-américains, un enseignement interdisciplinaire se profile comme la réponse pour la prise en charge par l'École des enjeux de société (Lenoir & Sauvé, 1998).

Sur le plan pédagogique, les disciplines scolaires adoptent des formes d'enseignement qui permettent de traiter des questions en lien avec la vie quotidienne des élèves. Dans les pays anglophones, notamment, se développe le courant des « context-based approaches », en particulier dans l'enseignement de la chimie (Bennett & Lubben, 2006). Dans les programmes scolaires francophones apparaissent des objets de savoirs inédits, tels que les « éducations à... » (EA).

Les « éducations à... » supposent un enseignement interdisciplinaire qui peut parfois conduire à mettre de côté les dimensions spécifiques des savoirs scientifiques, au profit de la dimension « éducation » confiée à l'École (Martinand, 2016). De plus, nous ne connaissons pas d'étude qui relate des effets concrets de telles approches sur les apprentissages des élèves, en particulier relativement à l'élaboration de leur CST.

Dans notre travail, nous proposons une approche didactique de l'enseignement des problèmes environnementaux, en privilégiant une entrée pragmatique de la transposition des savoirs inhérents à ces problèmes, fondée dans l'analyse des pratiques d'enseignement-apprentissage observables dans les classes de chimie.

### 1.3 Une étude de la transposition didactique

En s'inspirant de la sociologie de Verret (1975), Chevallard (1985/1991) propose une distinction entre les contenus de savoirs considérés comme étant « à enseigner » et les « objets d'enseignement » (p. 39). Il nomme *transposition didactique* le processus de transformation d'un savoir à enseigner en objet d'enseignement.

La transposition didactique consiste en deux étapes. Tout d'abord, « identification et désignation de contenus de savoirs comme contenus à enseigner » (p. 39) ou *transposition didactique externe* — c'est-à-dire en dehors de la classe. Cette première étape est réalisée par les instances politiques (l'Organisation des Nations Unies, les gouvernements des États, etc.), désignées par Chevallard (1985/1991) sous le nom de *noosphère*. Les missions de l'École relatives à l'instruction et l'éducation des élèves sont définies par la noosphère par le jeu de la transposition didactique externe. Puis intervient un second niveau de transformation du savoir, à la main de l'enseignante ou de l'enseignant. En effet, dans sa définition de la transposition didactique, Chevallard (Chevallard, 1985/1991) considère l'ensemble des adaptations subies par un « objet de savoir » pour devenir un « objet d'enseignement », y compris l'influence de l'interprétation des programmes. Ainsi, les ressources d'enseignement peuvent présenter certaines formes d'objets, qui pourront évoluer ensuite par le travail de transposition didactique du sujet enseignant au moment de la préparation de sa séquence. Enfin, l'enseignante ou l'enseignant agit sur le processus transpositif au sein même de la classe, au moment de la mise en œuvre de l'enseignement, on parle alors de *transposition didactique interne*.

Nous proposons dans ce travail une étude ascendante de la transposition didactique. Dans cet objectif, nous partons du savoir effectivement enseigné dans les classes pour remonter vers le savoir de référence. Pour cela, nous nous plaçons dans le modèle de l'action didactique conjointe (Ligozat & Leutenegger, 2023; Schubauer-Leoni et al., 2007; Sensevy & Mercier, 2007) qui nous offre un triplet d'outils — mésogenèse, topogenèse, chronogenèse — pour comprendre le fonctionnement du système didactique *in situ* à travers la relation contrat didactique-milieu. La modélisation des pratiques d'enseignement-apprentissages en termes de systèmes didactiques permet de définir un *tertium comparationis* utile à la

mise en perspective de systèmes issus de contextes institutionnels différents. En ce qui nous concerne, nous comparons les systèmes scolaires du canton de Genève en Suisse romande et de la France.

Le système didactique que nous considérons est la classe de chimie, au cycle 3 en Suisse romande (élèves de 14-15 ans), au cycle 4 en France (élèves de 13-14 ans). Cette dernière fait alors fonction de laboratoire anthropologique propice à l'étude des processus d'enseignement-apprentissage dans leurs dimensions spécifiques et génériques. Ainsi, une analyse épistémologique des savoirs de référence de cette discipline scolaire, mais aussi des prescriptions officielles et des ressources d'enseignement des deux contextes mis à l'étude contribue à l'étude de la transposition didactique externe. Dès lors, nous nous plaçons dans une double approche : didactique de la chimie et didactique comparée.

Une telle approche nous permet de comprendre comment l'étude d'un problème complexe relatif au rôle des activités anthropiques dans le phénomène de réchauffement climatique peut être prise en charge au sein même de la discipline scolaire « chimie » au début du secondaire, en appui sur la transposition des différents savoirs de référence impliqués. En effet, l'étude d'un tel problème peut potentiellement créer une tension au niveau de la transposition didactique, en demandant d'aménager l'enseignement de savoirs associés à des enjeux potentiellement différents du point de vue de la société : les transformations chimiques de la matière modélisées comme des réactions chimiques et l'origine anthropique du réchauffement climatique en tant que problème complexe. De notre point de vue, cette tension peut être levée par une approche codisciplinaire, au sens de Chevallard (2004), de l'origine du réchauffement climatique dans le cadre du cours de chimie au secondaire I.

#### 1.4 Plan du manuscrit

La présente thèse est structurée en cinq parties. La première partie regroupe trois chapitres : cette introduction (chapitre 1) suivie du chapitre 2, centré sur une étude épistémologique et didactique du concept de transformation chimique. Enfin, le chapitre 3 interroge l'insertion des problèmes environnementaux dans la discipline scolaire « chimie », à partir d'une étude curriculaire, d'une revue de littérature internationale ainsi que d'une enquête par questionnaire des pratiques d'enseignement.

La deuxième partie présente les différents outils théoriques qui soutiennent notre problématique et nos questions de recherche. Elle contient également trois chapitres. Dans le chapitre 4, nous examinons le potentiel d'un enseignement codisciplinaire (au sens de Chevallard, 2004) pour envisager l'étude d'un problème complexe — le réchauffement climatique — en classe de chimie. Le chapitre 5 est l'occasion de présenter les outils dont dispose la didactique comparée pour l'étude des systèmes didactiques, en particulier ceux développés dans le cadre du modèle de l'action didactique conjointe. L'ensemble de ces concepts et modèles nous permet de formuler une problématique et quatre questions de recherche, objets du chapitre 6.

La troisième partie est composée de deux chapitres et rend compte de la méthodologie de notre étude. Le chapitre 7 se concentre sur la méthodologie de recueil des données, tandis que le chapitre 8 expose notre méthodologie d'analyse à partir des outils introduits dans la partie précédente.

La quatrième partie présente les résultats des analyses. Elle est organisée en deux chapitres, qui rendent compte de deux grains d'analyse différents. Le chapitre 9 présente tout d'abord une étude des systèmes didactiques à l'échelle macroscopique, puis deux études de cas à l'échelle mésoscopique. Le chapitre 10 propose une mise en perspective de quatre études de cas, chacun analysé à l'échelle microscopique.

Enfin, la cinquième partie est composée de deux chapitres relatifs aux conclusions et perspectives de la thèse. Dans le chapitre 11, nous discutons les principaux résultats qui émergent de la partie précédente et nous tentons d'en dégager des perspectives pour le développement d'un tel projet de recherche et pour la formation des enseignants et des enseignantes. Le chapitre 12 propose une conclusion générale et des pistes d'ouverture.

## CHAPITRE 2 — ÉTUDE D'UN OBJET DE SAVOIR SPÉCIFIQUE : LA TRANSFORMATION CHIMIQUE

Je mis de l'eau dans un bécher, y fis dissoudre une pincée de sel, retournai dedans deux pots à confiture vides, trouvai deux fils de cuivre gainés de caoutchouc, les fixai aux pôles de la pile et introduisis les extrémités dans les verrines. Des extrémités des fils montait une minuscule procession de petites bulles : en regardant bien on distinguait même que de la cathode se libérait approximativement le double du gaz qui s'échappait de l'anode. J'écrivis au tableau l'équation bien connue et j'expliquai à Enrico que ce qui était écrit était exactement en train de se passer. Enrico ne paraissait pas tellement convaincu, mais il faisait déjà sombre et nous étions à demi engourdis par le froid ; nous nous lavâmes les mains et, ayant acheté en chemin un peu de gâteau de châtaignes, nous rentrâmes chez nous, laissant l'électrolyse continuer toute seule. Le lendemain nous trouvâmes encore la voie libre. Le verre de la cathode, délicat hommage à la théorie, était presque rempli de gaz, celui de l'anode était plein à moitié : je le fis remarquer à Enrico, en me donnant le plus d'importance que je pouvais et en tentant d'éveiller en lui le soupçon que, sinon l'électrolyse, du moins son application comme confirmation de la loi des proportions définies était de mon invention, le fruit de patientes expériences menées dans le secret de ma chambre.

Primo Lévi, extrait de « Hydrogène » dans *Le Système périodique*<sup>4</sup>

Ce chapitre se concentre sur le concept de transformation chimique. Dans un premier temps, en guise de contextualisation, nous présentons une revue extensive des recherches internationales à propos de l'enseignement et de l'apprentissage de ce concept, en particulier au moment de son introduction dans les curricula (secondaire I). Dans une deuxième partie, nous discutons le modèle d'organisation des savoirs en chimie proposé par Kermen (2018) à propos de l'enseignement de la transformation chimique au secondaire II. Cette discussion, à la lumière des curricula de chimie francophones, nous permet de proposer des ajustements au modèle de Kermen (2018) pour représenter la modélisation de la transformation chimique au secondaire I. Enfin, notre analyse épistémologique met en évidence le potentiel de la transformation chimique pour comprendre l'anthropocène, ce qui ouvre la porte aux enjeux de l'acquisition d'une culture scientifique et technique dans le cadre des enseignements de chimie du secondaire I.

### 2.1 La transformation chimique dans les recherches en didactique

La transformation chimique, modélisée par le concept de réaction chimique, est un (sinon le) savoir central du curriculum de chimie. En particulier parce qu'elle met en relation un phénomène expérimental et sa modélisation à des niveaux conceptuels macroscopique et microscopique, nous y reviendrons dans la section 2.2. De nombreuses études en didactique s'intéressent donc à ce concept et à son processus d'enseignement-apprentissage. Nous réalisons une revue de littérature extensive à ce sujet. Cette recherche demande la définition d'un champ pour le corpus visé, que nous allons présenter dans une première partie, en commençant par la méthodologie de recherche bibliographique adoptée.

---

<sup>4</sup> Lévi (1975, p. 34-35).

## 2.1.1 Méthodologie de la revue de littérature internationale

### 2.1.1.1 Critères délimitant le champ du corpus

Nous nous intéressons à tous les travaux à propos de la transformation chimique telle que modélisée au début du secondaire, c'est-à-dire comme une réaction chimique — soit la transformation de molécules par réarrangement d'atomes (Ministère de l'Éducation nationale, de la jeunesse et des sports, 2020, p. 98). La modélisation de la transformation chimique mobilise le principe de conservation de la matière et un système de représentation spécifique : l'équation de réaction chimique. Les travaux sur ces concepts sont donc intégrés à notre corpus. À propos de l'équation de réaction en particulier, nous intégrons les travaux traitant de son écriture comme « équation bilan » pour modéliser un phénomène expérimental, tâche essentielle des curricula francophones du secondaire I (cf. 2.2.1), et nous écartons toutes les équations de mécanismes réactionnels renvoyant à la chimie organique abordée au secondaire II et dans l'enseignement supérieur. Aussi, nous intégrons au corpus les travaux sur l'équilibre des équations de réaction, mais écartons ceux relevant de l'étude thermodynamique des systèmes, au programme du secondaire II. Enfin, lorsque cela est pertinent, nous intégrons quelques études qui ne concernent pas la transformation chimique spécifiquement, mais l'enseignement de la chimie plus généralement. Par exemple, des études épistémologiques à propos de systèmes de représentations en chimie, si elles sont liées à l'équation de réaction chimique. Ou encore les travaux à propos des conceptions en chimie en général qui mentionnent le cas des transformations chimiques.

### 2.1.1.2 Méthode de la recherche bibliographique

Nous retenons des recherches à tous les niveaux d'enseignement, du primaire au supérieur, lorsque cela est pertinent — en particulier pour les études s'intéressant aux conceptions des élèves —, et menées sur tous les continents. Afin de faire correspondre les niveaux des systèmes scolaires internationaux, nous nous appuyons sur l'organisation du système nord-américain — une majorité de recherches sont en effet publiées en anglais dans des revues nord-américaines — que nous avons mis en correspondance avec les systèmes scolaires français et suisse-romand (cf. annexe 1). Cette mise en perspective nous permet de repérer les transitions entre enseignements primaire, secondaire I, secondaire II et supérieur, à la lumière de l'âge des élèves. Elle nous donne un point de comparaison pour l'étude que nous menons.

Concernant les matériaux étudiés, nous nous limitons aux publications académiques (revues, ouvrages et thèses) publiées en langues anglaise, française et espagnole<sup>5</sup>. Pour le cas des publications dans des revues, nous nous concentrons sur les processus d'expertise en double aveugle.

Pour cela, nous réalisons une première recherche dans les bases de données relatives aux recherches systématiques en sciences de l'éducation : (par ordre alphabétique) *International Database of Education Systematic Review (IDESR)*<sup>6</sup>, *The Campbell Collaboration*<sup>7</sup>, *What Works Clearinghouse*<sup>8</sup>. Pour cette recherche préliminaire, nous utilisons les expressions suivantes : « chemical reaction » ; « chemical

---

<sup>5</sup> Ce choix est premièrement pragmatique, ce sont les langues que nous comprenons et qui nous permettent de faire une recherche bibliographique rigoureuse ; deuxièmement scientifique, ces trois langues font partie des six langues officielles de l'Organisation des Nations Unies (ONU) (ONU, s. d.) parce qu'elles sont parmi les langues les plus parlées dans le monde (Moreau, 2022). De plus, depuis le siècle dernier, l'anglais s'est imposé comme la langue de communication scientifique internationale (Fondin, 1979; Hamel, 2013).

<sup>6</sup> <https://idesr.org/>

<sup>7</sup> <https://www.campbellcollaboration.org/>

<sup>8</sup> <https://ies.ed.gov/ncee/wwc/FWW>

change ». Nous n'obtenons aucun résultat, ce qui renforce la nécessité de réaliser la revue de littérature extensive à laquelle nous nous employons.

Nous consultons ensuite des bases de données génériques puis plus spécifiques des sciences de l'éducation : (du générique au spécifique) *HAL science ouverte*<sup>9</sup>, *Persée*<sup>10</sup> et *Educational Resources Information Center (ERIC)*<sup>11</sup> ; ainsi que les bases de données répertoriant les thèses : *Thèse.fr*, *HAL thèses*<sup>12</sup>, *Open Access Thesis and Dissertation*<sup>13</sup>. Nous utilisons les mots-clefs suivants pour ces bases de données

- en anglais : learning chemical reaction; teaching chemical reaction; teaching learning chemical reaction; teaching chemical change; learning chemical change; teaching learning chemical change
- en français : enseigner réaction chimique ; apprendre réaction chimique ; enseignement apprentissage réaction chimique ; enseigner transformation chimique ; apprendre transformation chimique ; enseignement apprentissage transformation chimique

Nous utilisons également la troncature pour rechercher certains termes au pluriel : « chemical reaction\* » ou encore « transformation\* chimique\* ».

Cette première recherche nous permet d'obtenir une centaine de publications, provenant majoritairement de revues académiques spécialisées dans l'enseignement et l'apprentissage des sciences. Nous poursuivons donc par une recherche systématique dans toutes les revues de didactique des sciences et didactique de la chimie auxquelles nous avons accès<sup>14</sup> (39 en tout, cf. annexes 4 et 5). Nous avons utilisé les mots-clefs « chemical reaction », « chemical change », « réaction chimique », « transformation chimique », complétés par les mots-clefs en espagnol « reacción química » ; « cambio químico » dans les revues hispanophones<sup>15</sup> (Tableau 1). Enfin, ces résultats sont complétés par une recherche dans *Google Scholar*<sup>16</sup> avec les mêmes mots-clefs.

---

<sup>9</sup> <https://hal.science/>

<sup>10</sup> <https://www.persee.fr/>

<sup>11</sup> <https://eric.ed.gov/>

<sup>12</sup> <https://theses.hal.science/>

<sup>13</sup> <https://oatd.org/>

<sup>14</sup> C'est-à-dire celles accessibles depuis les portails des Bibliothèques Universitaires de Genève et de Montpellier.

<sup>15</sup> Lors de notre première recherche dans la base de données internationale, nous nous sommes rendu compte que les publications hispanophones disposaient le plus souvent d'un titre et de mots-clefs en anglais, nous avons réussi à l'intégrer à notre corpus à partir de la recherche avec mots-clefs en anglais.

<sup>16</sup> <https://scholar.google.fr/>

<b>Bases de données relatives aux revues systématiques en sciences de l'éducation</b>		
IDESR/The Campbell Collaboration/What Works Clearinghouse		
chemical reaction chemical change		
<b>Base de données relatives aux publications scientifiques et aux thèses</b>		
ERIC/HAL/HAL theses/Open Access Thesis and Dissertation	HAL/HAL theses/Persée/Thèse.fr	
learning chemical reaction teaching chemical reaction teaching learning chemical reaction teaching chemical change learning chemical change teaching learning chemical change	enseigner réaction chimique apprendre réaction chimique enseignement apprentissage réaction chimique enseigner transformation chimique apprendre transformation chimique enseignement apprentissage transformation chimique	
<b>Revue internationale en didactique des sciences ou de la chimie</b>		
Anglais	Espagnol	Français
chemical reaction chemical change	reacción química cambio químico	réaction chimique transformation chimique

*Tableau 1: mots-clefs utilisés pour la recherche bibliographique*

Nous étudions les titres puis les résumés des ressources identifiées. Nous consultons parfois leur contenu lorsque les titres et résumés seuls ne suffisent pas à répondre aux critères susmentionnés.

Dans notre recherche d'exhaustivité, vis-à-vis du temps imparti pour cette recherche, nous sommes contrainte à écarter les revues dites « d'interface », qui sont souvent portées par les associations d'enseignants et d'enseignantes. Bien que nous convenions que des travaux issus de la recherche en didactique peuvent être publiés dans de telles revues, nous avons, dans la majorité des cas, trouvé des travaux présentant des méthodes d'enseignement de la transformation chimique à différents niveaux scolaires. Nous prenons compte de ce résultat, sans faire figurer ces travaux dans notre corpus. Nous écartons également les résumés de communications dans des colloques — à l'exception des textes publiés dans des Actes — pour les mêmes raisons de contrainte de temps, mais aussi parce qu'ils ne présentent pas les informations suffisantes pour répondre à nos critères.

Un des articles issus de notre recherche bibliographique a été retiré du corpus a posteriori. Celui-ci (Azamjonovich, 2021) présente les critères d'inclusion nécessaires, mais une lecture plus approfondie

de son contenu au cours de la construction de notre argumentaire a révélé un certain nombre d'incohérences qui nous ont finalement conduite à l'écartier.

Notre corpus est finalement constitué de deux cent huit publications (cf. annexe 6), dont nous présentons les détails dans la section suivante.

### 2.1.2 Présentation du corpus

Parmi ces deux cent huit ressources, 81 % sont rédigées en anglais (cent soixante-huit), 18 % en français (trente-huit) et 1 % en espagnol (deux) (Figure 1).

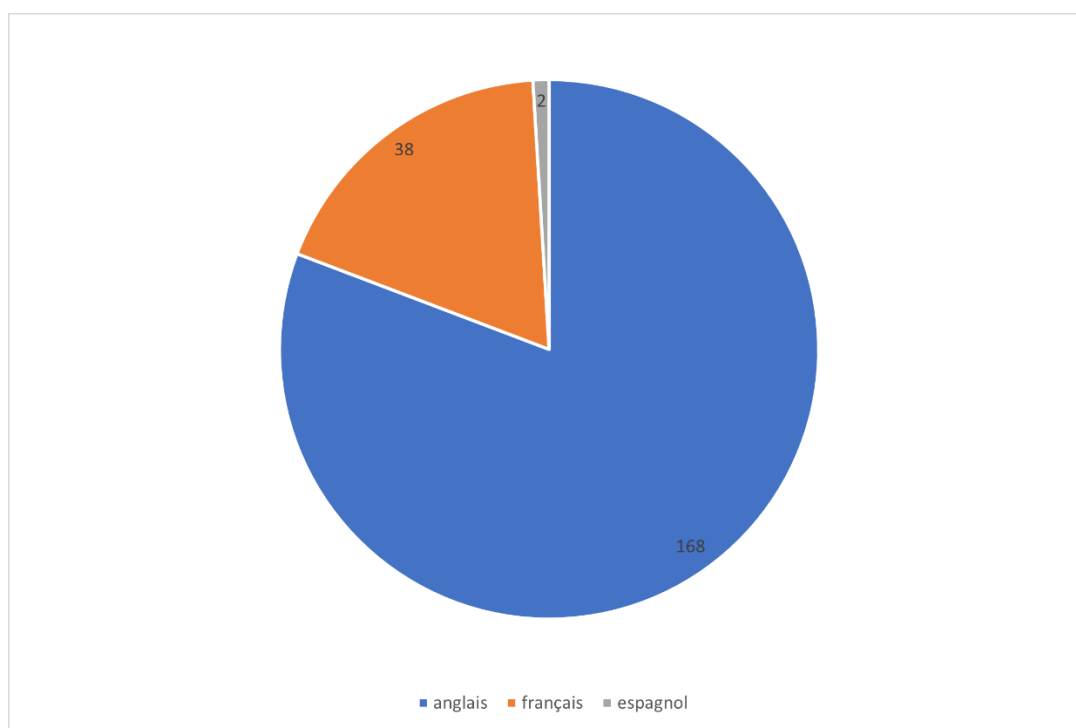


Figure 1 : répartition des publications en fonction de la langue de rédaction

Les publications retenues proviennent de trente-neuf pays situés sur tous les continents. Une majorité est issue de travaux américains (trente-cinq), français (vingt et un) et turcs (vingt et un). Le corpus comprend également onze travaux espagnols (Figure 2).

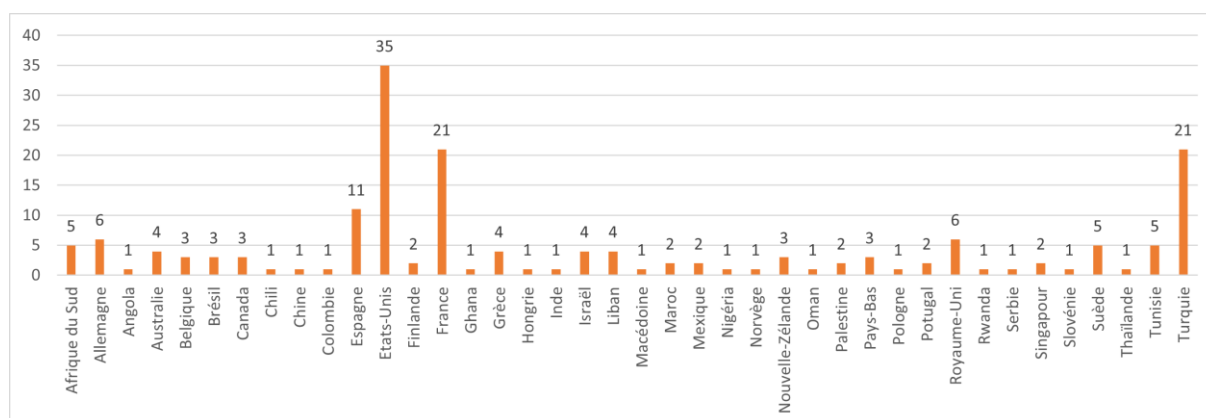


Figure 2 : répartition des publications par continent

Les autres pays : Afrique du Sud, Allemagne<sup>17</sup>, Angola, Australie, Belgique, Brésil, Canada, Chili, Chine, Colombie, Finlande, Ghana, Grèce, Hongrie, Inde, Israël, Liban, Macédoine, Maroc, Mexique, Nigeria, Norvège, Nouvelle-Zélande, sultanat d'Oman, Palestine, Pays-Bas, Pologne, Portugal, Royaume-Uni, Rwanda, Serbie, Singapour, Slovénie, Suède, Thaïlande, Tunisie, sont représentés par une à six publications (Figure 3).

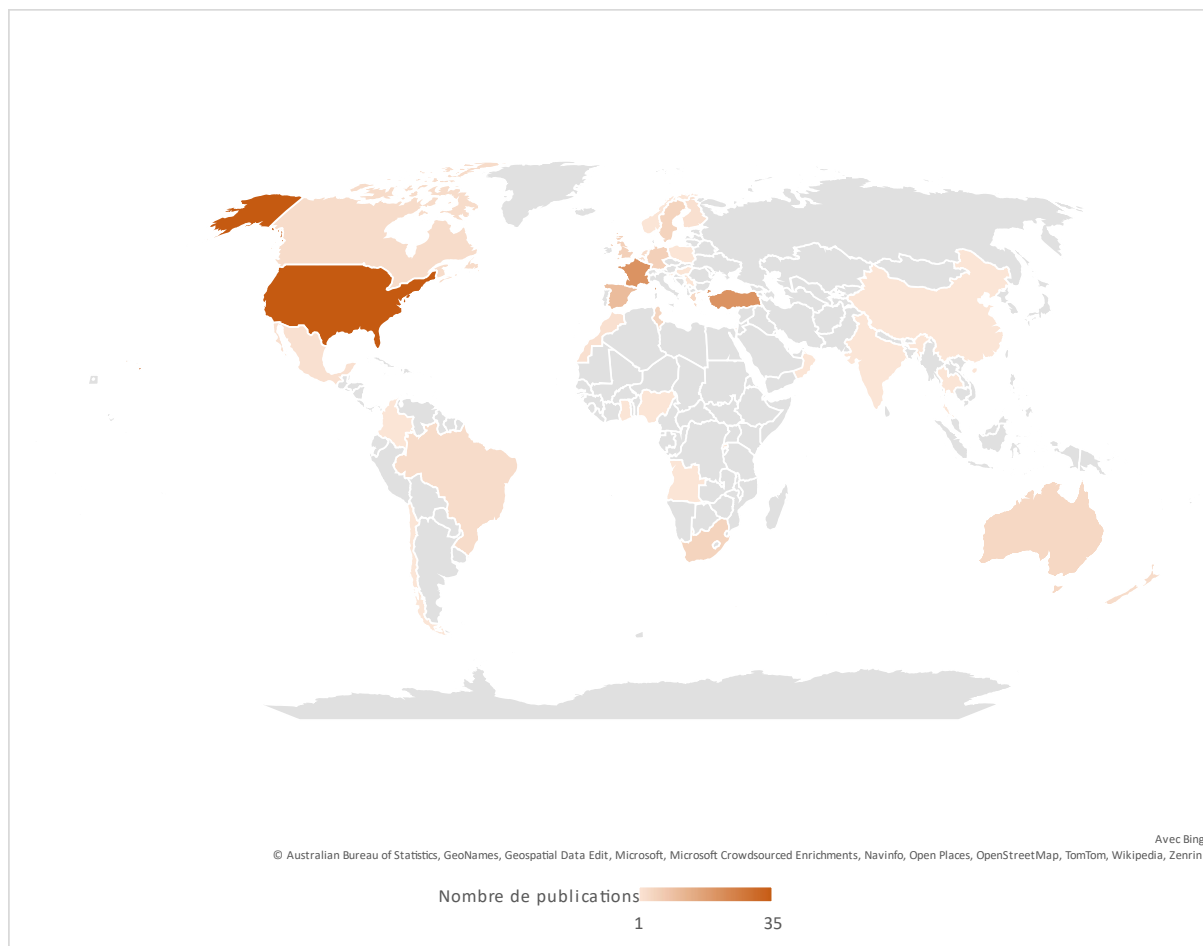


Figure 3 : nombre de publications par pays

Les ressources retenues retracent un siècle d'histoire de la discipline scolaire « chimie » : la plus ancienne publication datant de mille neuf cent vingt-quatre et la plus récente de deux mille vingt-trois, date à laquelle nous écrivons ce chapitre.

Un petit nombre de ressources numérisées (seize, moins de 8 % du corpus) a été trouvé pour les décennies précédant les années quatre-vingt-dix. On observe une augmentation constante du nombre de publications pour les décennies suivantes (Figure 4).

---

<sup>17</sup> Le nombre de publications à ce sujet en Allemagne (six) paraît peu représentatif, dans la mesure où la chimie est un des champs les plus développés de l'industrie de ce pays. Aussi, la Turquie, qui développe de nombreux partenariats avec l'Allemagne, présente vingt et une publications sur l'enseignement de la transformation chimique. Il est probable que le plus grand nombre des travaux allemands à ce sujet soient publiés en langue germanique et qu'ils aient ainsi échappé à notre revue de littérature.

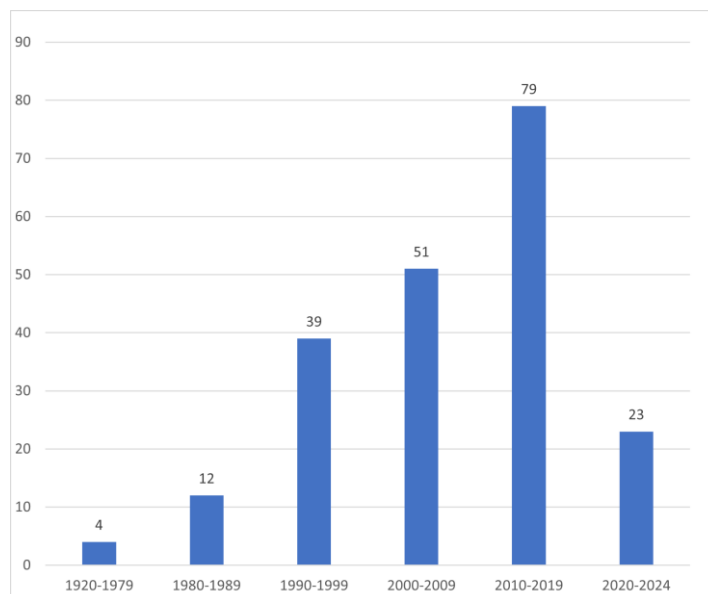


Figure 4 : répartition des publications en fonction du temps

Ceci s'explique certainement par la naissance d'internet en 1989 (CERN, 2023) et sa généralisation dans le domaine de la recherche dans le courant des années quatre-vingt-dix. Avancée technologique à laquelle il faut probablement ajouter un intérêt croissant des recherches pour l'enseignement et l'apprentissage de la transformation chimique au secondaire I, en particulier dans les années deux-mille-dix avec une augmentation de plus de 50 % des publications à ce sujet. Le nombre de publications à la fin de la décennie actuelle pourra nous renseigner sur un « effet intérêt » ou « effet de mode » sur l'augmentation des publications dans les années quatre-vingt-dix à deux-mille-dix, en particulier si ce nombre décroît au cours des années deux-mille-vingt, l'utilisation d'internet étant quant à elle exponentielle.

Intéressons-nous à présent au sujet de ces travaux de recherche en fonction des décennies de publication.

## 2.1.3 Évolution des sujets des publications à travers le temps

### 2.1.3.1 Répartition des publications en fonction de leurs sujets

L'étude des deux cent huit résumés nous a permis d'établir quinze catégories de sujets de recherche (Figure 5).

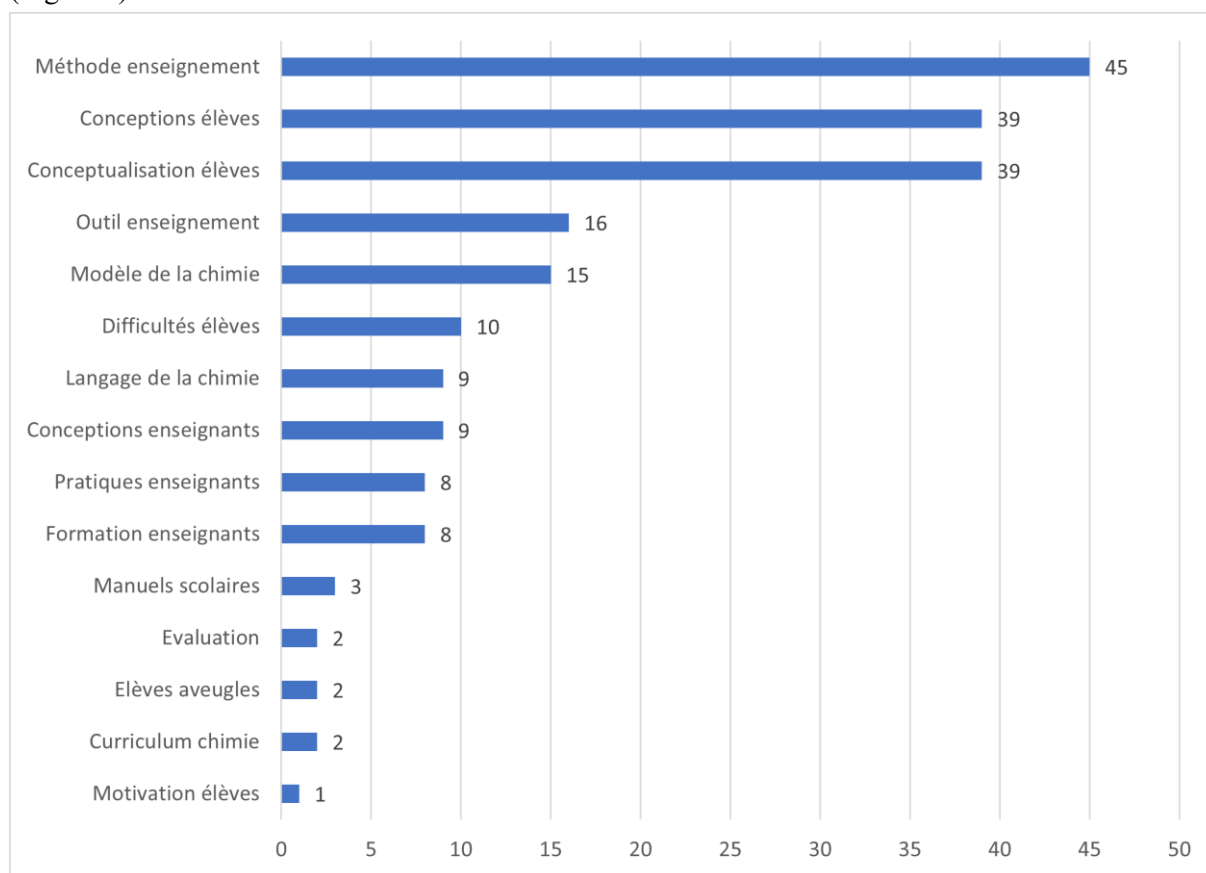


Figure 5 : répartition des publications par catégories de sujets

Une majorité de publications (quarante-cinq, 22 % du corpus) mettent à l'étude une méthode pour enseigner la transformation chimique au secondaire.

Certaines sont des méthodes spécifiques à l'enseignement de la chimie (Ardac & Akaygun, 2005; Bond, 1989; Chandrasegaran et al., 2008; Eilks et al., 2013; Emden et al., 2018; Falk, 1956, 1962; Gaudillière, 1994; Gielniak, 2009; Justi, 2006; Kingir et al., 2014; Milanovic & Trivic, 2017; Paxao & Cachapuz, 2000; Rodrigues da Silva et al., 2016; Selco et al., 2012; Swinehart, 1985).

D'autres travaux cherchent à appliquer des méthodes plus génériques à l'enseignement de la transformation chimique. Par exemple l'enseignement à travers les activités de recherche (Furió et al., 1994), selon une approche constructiviste (Vérin, 1998), en lien avec des questions de la vie quotidienne<sup>18</sup> (Adams, 1999; Barker & Millar, 1999; Çiğdemoğlu, 2012; Demircioğlu et al., 2013; Sadi-Yilmaz et al., 2022) ou technologiques (Ayyildiz et al., 2023; Ewais & De Troyer, 2019; Gabby et al., 2017), selon une approche expérimentale (Aouad & Andreucci, 2015; Hugerat & Basheer, 2001; Puggian et al., 2013) ou en utilisant un support vidéo (Pekdağ & Le Maréchal, 2001; Schlosser, 2012),

<sup>18</sup> Nous mettons dans cette catégorie les approches de type « context-based learning ».

à travers la démarche d’investigation (Beck et al., 2010; Németh et al., 2023; Younis, 2017), selon la méthode « guided discovery instructional strategy (GDIS) » (Kibirige & Lehong, 2022; Kibirige & Maake, 2021), par apprentissage centré sur la tâche (Musengimana et al., 2022). Enfin, cinq études préconisent une première approche des transformations de la matière dès l’enseignement primaire (Gupta et al., 2017; Laugier & Padeloup, 1994; Selco et al., 2012; Vérin, 1998; Waterman & Bilsing, 1983).

Trente-neuf études (19 % du corpus) s’intéressent aux conceptions des élèves dans quinze pays du globe : l’Afrique du Sud (Huddle & Pillay, 1996), l’Allemagne (Düsing et al., 2019), l’Australie (Garnett et al., 1995; Rahayu & Tytler, 1999), le Brésil (de Cássia Reis & da Silva Lopes, 2016), le Chili (Merino & Sanmarti, 2008), l’Espagne (Gomez et al., 1995; Prieto et al., 1992; Sesto & García-Rodeja, 2021), les États-Unis (Abraham et al., 1994; Hesse, 1987; Hesse & Anderson, 1992; Johnson, 2000, 2002; Scott et al., 2007; Yan & Talanquer, 2015), la Finlande (Ahtee & Varjola, 1998), la France (Chomat et al., 1988; Larcher et al., 1994; Méheut, 1982, 1985; Solomonidou & Stavridou, 1994; Stavridou, 1990), la Grèce (Papageorgiou et al., 2010; Stavridou & Solomonidou, 1989), Israël (Basheer et al., 2018), les Pays-Bas (Dehon & Snauwaert, 2015; van Driel et al., 1998), le Maroc (Touli et al., 2012), la Nouvelle-Zélande (Lajium, 2013), le Royaume-Uni (Baker, 1994, 2000), la Slovénie (Slapničar et al., 2018), la Suède (Andersson, 1986, 1990; Eskilsson & Helldén, 2003; Holgersson & Löfgren, 2004), la Turquie (Yildirim & Demirkol, 2018). La représentation de ces données sur une carte choroplèthe (Figure 6) permet d’identifier que ces études sont majoritairement menées dans des pays occidentaux<sup>19</sup>, quelques-unes en Amérique du Sud. Peu ou pas de recherches à ce sujet concernent les élèves des continents africain ou asiatique.

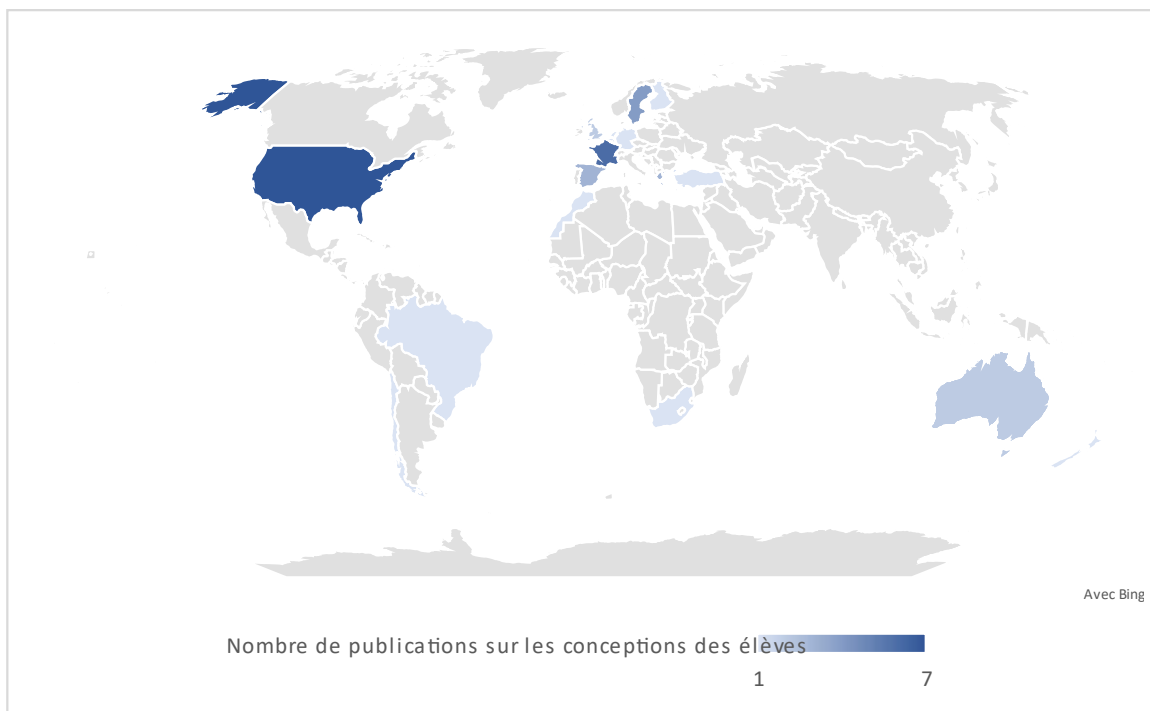


Figure 6 : répartition des publications portant sur les conceptions des élèves en fonction des pays

<sup>19</sup> Sans ignorer la dimension post-colonialiste que peut prendre ce terme aujourd’hui dans l’espace public, nous l’utilisons ici au sens de la politique internationale (« Occident », 2012).

Ces études s'accordent à dire que la transformation chimique est un concept particulièrement difficile pour les élèves qui peinent à concilier description des phénomènes expérimentaux et modèle d'explication abstrait. Ces difficultés liées à la modélisation se retrouvent jusque dans l'enseignement supérieur.

Trente-neuf publications (19 % du corpus) étudient la façon dont les élèves acquièrent les modèles nécessaires à la compréhension de la transformation chimique à différents niveaux de la scolarité. Nous avons appelé cette catégorie « conceptualisation », car elle relève de la capacité des élèves à comprendre et mobiliser des concepts spécifiques pour l'étude de situations. Parmi elles, cinq empruntent des outils à la psychologie cognitive (Kypraios et al., 2014; Nakiboğlu, 2023; Stamovlasis et al., 2015; Thomas & McRobbie, 2013; Ürek & Dolu, 2020). L'article de Taskin et Bernohlt (2014) quant à lui rend compte d'une revue de littérature internationale.

Seize publications proposent des outils innovants pour l'enseignement de la transformation chimique (8 % du corpus). En particulier, des outils de simulation informatique.

Quinze références s'inscrivent dans le domaine de l'épistémologie de la chimie en cherchant à définir un modèle d'organisation des savoirs de la discipline (8 % du corpus). Certains de ces travaux spécifient des modèles de savoir plus génériques (Kermen, 2018), d'autres s'appuient sur une analyse épistémologique (Johnstone, 1982, 1991, 2000; Justi & Gilbert, 2003; Kermen & Méheut, 2009; Taber, 2001, 2012, 2013, 2018; Talanquer, 2011; Trellu & Toussaint, 1986; Weninger, 1982) ou historique (Harré, 2008; Laugier & Dumon, 2004; Palmer, 2003). En relation avec le modèle épistémologique de savoir de la chimie, neuf études s'intéressent plus précisément à sa dimension représentative (5 % du corpus). Parce que cette dimension est singulière en chimie dans sa double fonction de communication et de conceptualisation (cf. 2.2.1), nous avons nommé cette catégorie « Langage de la chimie ».

Dix études s'intéressent aux difficultés rencontrées par les élèves en situation d'enseignement-apprentissage (5 % du corpus). Ces résultats sont souvent mis en relation avec les études sur les conceptions et celles à propos du modèle épistémologique de la chimie, afin d'expliquer les origines de difficultés identifiées.

Neuf publications mentionnent les conceptions des enseignants et enseignantes du primaire ou du secondaire, en particulier au moment de leur formation (4 % du corpus). Ces études sont significativement moins nombreuses que les études des conceptions des élèves. De plus, elles sont menées dans seulement cinq pays : quatre en Turquie (Bilir & Karaçam, 2021; Çalik & Ayas, 2005; Eyceyurt-Türk & Tüzün, 2021; Kolomuç & Tekin, 2011), deux en Espagne (Martin del Pozo & Porlán, 2001; Porlán Ariza et al., 1998), une aux États-Unis (Stein et al., 2008), une en Finlande (Härmälä-Braskén et al., 2020) et une dans le Sultanat d'Oman (Al-Balushi, 2009).

Huit publications sont relatives aux pratiques d'enseignement (4 %). Une concerne l'enseignement de la transformation chimique au primaire en Tunisie (Soltani & Khiari, 2023), une l'enseignement secondaire inférieur en Angola (Baca et al., 2014), cinq l'enseignement secondaire supérieur en France (Bouard et al., 2022), aux Pays-Bas (de Jong & van Driel, 2004), en Tunisie (Ben Kilani, 2019; Dumon & Mzoughi-Khadhraoui, 2014; Mzoughi-Khadhraoui et al., 2013).

La thèse de Scott (1997) se démarque par une approche vygotkienne du discours lors des interactions en classe de chimie au secondaire (États-Unis). Une analyse du discours des sujets enseignants est également menée par Mzoughi-Khadhraoui et al. (2013) à travers la définition de facettes du discours,

analysées à l'aide du quadruplet de la chimie tel que défini par Kermen et Méheut (2009). À propos des mêmes sujets, Dumon et Mzoughi-Khadhraoui (2014) étudient plus particulièrement les interactions avec les élèves mises en jeu dans l'enseignement du modèle de la réaction chimique au début du lycée (secondaire II). Les études de de Jong et van Driel (2004); Soltani et Khiari (2023) analysent les pratiques d'enseignement à la lumière de leurs Pedagogical Content Knowledge (PCK). Deux études analysent les pratiques enseignantes grâce aux outils de la Théorie de l'action conjointe en didactique (TACD), en particulier à travers le découpage des séances en termes de jeux didactiques (Ben Kilani, 2019; Soltani & Khiari, 2023). Une étude adopte la double approche didactique et ergonomique (DADE) pour l'étude des pratiques en classe (Bouard et al., 2022).

En d'autres termes, bien qu'une diversité de méthodes d'analyses soit décrite dans les paragraphes précédents, les résultats de notre revue de littérature montrent la très faible part occupée par les travaux sur les pratiques ordinaires d'enseignement de la transformation chimique, en particulier au début de son enseignement (0,5 % du corpus).

Huit publications concernent la formation des enseignants et enseignantes de chimie au secondaire (4 % du corpus), certaines en lien avec les conceptions des élèves dont nous avons parlé précédemment. Une étude s'intéresse à la formation des sujets enseignant au primaire à propos des changements de la matière (Merino Rubilar, 2009).

Du point de vue des ressources d'enseignement, trois études analysent les manuels scolaires de tous niveaux (moins de 1 % du corpus). L'étude de Pedrosa et Dias (2000) se restreint au niveau secondaire au Portugal. Toujours au secondaire, l'étude d'Aydin et al. (2014) compare les manuels turcs, indiens et américains. Enfin, Palmer et Treagust (1996) proposent une étude comparative de plusieurs pays à tous les niveaux d'enseignement. De plus, deux études se consacrent à l'analyse des curricula de chimie : Deavor (1990) aux États-Unis et Timofte (2015) dans le contexte allemand<sup>20</sup>.

Deux études s'intéressent à l'évaluation des apprentissages des élèves (1 % du corpus), en lien avec la mesure du processus de conceptualisation (Cavallo et al., 2003; Chandrasegaran et al., 2007).

Enfin, nous identifions deux catégories de publications très confidentielles. La première regroupe deux publications qui examinent les méthodes d'enseignement de la chimie au secondaire pour des élèves souffrant de cécité. Cette catégorie d'études met en évidence que l'apprentissage des sciences expérimentales peut être sérieusement entravé par toutes sortes d'affections des sens. Or, moins de 1 % du corpus que nous avons constitué s'intéresse à ce public, ce qui tend à montrer une tendance validiste dans les recherches que nous avons étudiées. La dernière catégorie concerne une étude à propos des facteurs qui motivent les élèves à apprendre la chimie (0,5 % du corpus).

Le corpus comprend dix-neuf thèses de doctorat, publiées entre 1982 et 2014 (Aouad, 2014; Ayina, 2013; Baker, 2000; Chinn, 1997; Çiğdemoğlu, 2012; Cokelmez, 2005; El Bilani, 2007; Falk, 1956; Gielniak, 2009; Glazer, 2011; Hesse, 1987; Lajium, 2013; Laugier, 1998; Méheut, 1982; Merino Rubilar, 2009; W. P. Palmer, 2003; Schlosser, 2012; Scott, 1997; Stavridou, 1990). Parmi elles, treize sont rédigées en anglais (68 %), cinq en français (26 %) et une en espagnol (5 %). Ce qui correspond à

---

<sup>20</sup> Notons que notre étude comparée des curricula suisse-romands et français (Sudriès et al., 2023) pourrait rentrer dans cette catégorie. La considérant comme une partie du projet dans laquelle s'insère cette revue de littérature, nous ne l'avons pas intégrée au corpus bien qu'elle apparaisse dans les résultats de notre recherche bibliographique. Nous la présenterons dans le Chapitre 3.

une légère surreprésentation des travaux de thèse francophones et hispanophones par rapport à l'ensemble des travaux qui constituent le corpus (respectivement 18 % et 1 %).

Nous remarquons que parmi l'ensemble des réactions chimiques potentiellement étudiées, neuf études traitent de l'enseignement de la combustion (Basheer et al., 2018; de Jong, 1998; Laugier & Padeloup, 1994; Méheut, 1985; Méheut et al., 1984; Prieto et al., 1992; Rahayu & Tytler, 1999; Sesto & García-Rodeja, 2021; Soltani & Khiari, 2023). C'est le seul exemple de réaction chimique aussi représenté dans les études rassemblées dans ce corpus. Nous verrons dans la suite de ce chapitre en quoi cette réaction est un exemple prototypique pour la modélisation des transformations chimiques au début du secondaire et ce que son enseignement permet d'apprendre (cf. 2.3).

Enfin, nous relevons deux travaux qui étudient les transformations chimiques pour modéliser des phénomènes biologiques entre matière organique et matière minérale, dans le cadre des enseignements de biologie (Herrmann-Abell et al., 2016; Marmaroti & Galanopoulou, 2006). Ce lien entre les disciplines expérimentales nous intéresse particulièrement (cf. chapitre 1). Nous y reviendrons à la fin de ce chapitre.

### 2.1.3.2 Répartition des sujets d'étude au cours du temps

Parmi les sujets les plus représentés dans le corpus, les conceptions des élèves atteignent un pic dans les années quatre-vingt-dix. Bien que le sujet soit moins retrouvé dans les publications des décennies suivantes, on observe un certain nombre d'études à ce sujet (dix-huit) jusqu'à aujourd'hui. L'étude des méthodes d'enseignement et de la conceptualisation des élèves ont fait l'objet d'un plus grand nombre d'études au cours des années deux-mille-dix (Figure 7).

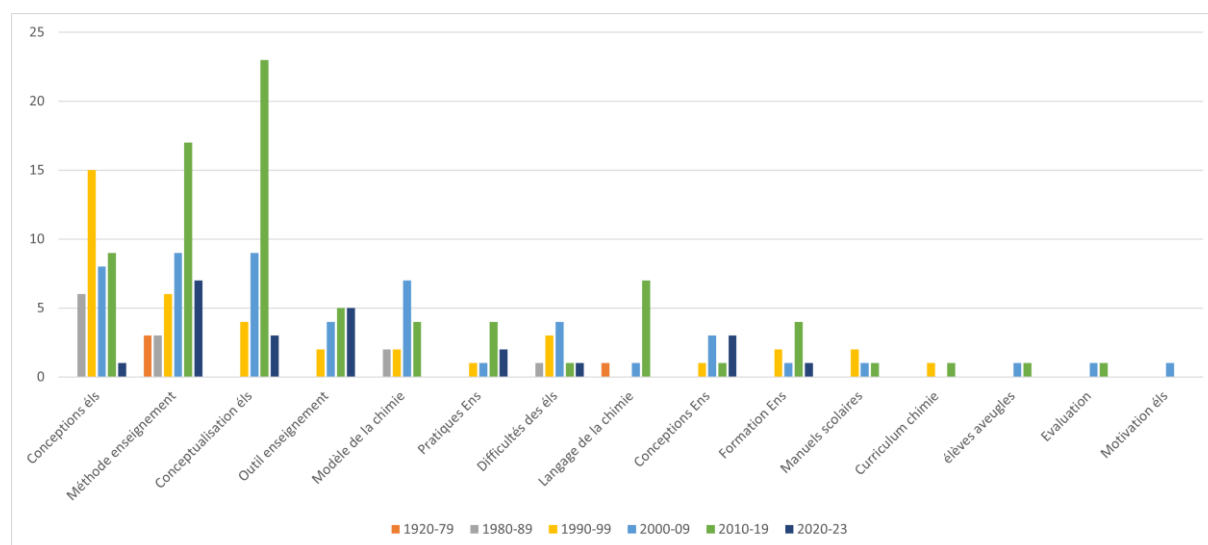


Figure 7 : nombre de publications par sujet et par décennie

À propos des outils d'enseignement, on voit un doublement des études à ce sujet au début des années deux-mille, chiffre qui s'accroît encore au cours des décennies suivantes, probablement en lien avec le développement de l'informatique et des nouvelles technologies.

Le modèle épistémologique de la chimie connaît lui aussi un essor de publication dans les années deux-mille (plus du triple du nombre de publications par rapport aux deux décennies précédentes), mais cette augmentation ne se poursuit pas au cours des années deux mille dix (baisse de 50 %) ni au début des

années deux-mille-vingt. De même que les conceptions des élèves sont moins considérées par les recherches au début de la décennie actuelle, au profit des méthodes et outils d'enseignement.

Enfin, l'analyse de ce corpus montre que le pôle enseignant est largement moins étudié que celui des élèves. On observe une augmentation des études sur leurs conceptions et leurs pratiques dans les années deux-mille. Puis le pic du nombre d'études de pratiques dans les années deux-mille-dix : cinq publications sur les soixante-dix-neuf recrutées dans notre corpus pour cette décennie soit environ 6 %. Parmi elles, aucune ne s'intéresse aux pratiques ordinaires d'enseignement au secondaire I en France.

Cette revue de littérature nous permet de dépeindre le contexte dans lequel se place notre étude. Le premier résultat qui attire notre attention est le faible nombre de travaux à propos des pratiques ordinaires d'enseignement-apprentissage, en particulier au début du secondaire. Comparativement, l'étude des conceptions des élèves, des méthodes d'enseignement ou celles centrées sur les apprentissages des élèves occupent les premières places des sujets de ces travaux de recherche. Cependant, il nous semble que l'étude des interactions en situation de classe devrait permettre de comprendre de manière approfondie les mécanismes de transmission du savoir, tout en prenant compte des paramètres qui contraignent et peuvent influencer la situation d'enseignement-apprentissage (conceptions, relation entre les sujets, temps, espace, matériel, etc.).

Deuxièmement, cette revue de littérature montre le manque d'études sur la façon dont l'enseignement de la transformation chimique peut contribuer à l'insertion de problèmes environnementaux en classe de chimie, permettant de concilier éducation scientifique et formation citoyenne. C'est l'angle que nous choisissons d'adopter dans notre travail. Une telle étude demande de considérer les spécificités épistémologiques de la discipline scolaire « chimie ». Nous nous y employons dans la section qui suit.

## 2.2 Le modèle épistémologique d'Isabelle Kermen

Nous choisissons de développer le modèle épistémologique des savoirs en chimie développé par Kermen (2018), parce qu'il s'intéresse spécifiquement au cas de l'enseignement des transformations chimiques, mais aussi parce qu'il s'appuie sur des modèles antérieurs développés dans le cadre de la chimie (Chomat et al., 1988; Johnstone, 1982; Larcher et al., 1994; Laugier & Dumon, 2003; Le Maréchal & Bécu-Robinault, 2006; Taber, 2013; Talanquer, 2011), de la physique (Tiberghien & Vince, 2005) ou de travaux plus génériques sur la modélisation (Martinand, 1998).

### 2.2.1 Ancrage dans les travaux d'épistémologie de la chimie

Sans entrer dans les détails du développement historique du modèle de la chimie, précisément décrits par Kermen (2018), nous rappelons seulement que l'une des spécificités de la discipline est de mettre en relation des savoirs à deux niveaux différents : le macroscopique (accessible aux sens) et le microscopique (théorique). Johnstone (1982, 1991, 1993, 2000) est le premier à modéliser l'activité des chimistes par la mise en relation de ces deux niveaux, auxquels il ajoute un niveau symbolique relatif aux systèmes de représentation (symboles, formules, équations, etc.), de sorte que ces trois niveaux forment un triangle (Figure 8).

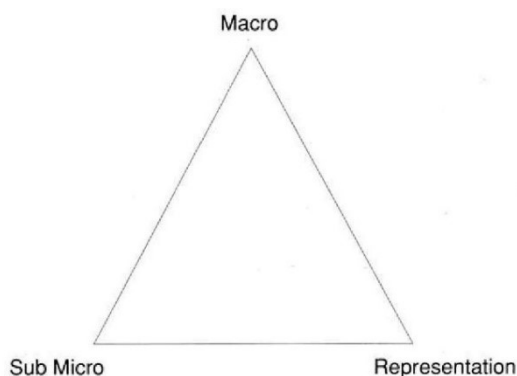


Figure 3. The new chemistry has three basic components: macrochemistry, submicrochemistry, and representational chemistry.

Figure 8 : triangle de Johnstone (1993, p. 3)

Le terme « submicroscopique » est employé par Johnstone dans son sens physique, c'est-à-dire « invisible au microscope » (« Submicroscopique », 2012). Les autres travaux en épistémologie de la chimie consultés lui préfèrent le terme « microscopique », littéralement « visible au microscope » (« Microscopique », 2012). Il s'agit probablement d'une abréviation progressive du terme « submicroscopique » au cours du temps et de l'usage en chimie. Nous remarquons par exemple que « microscopique » garde son sens premier en biologie, discipline où le microscope est un outil quotidien. Dans un souci de cohérence avec le modèle développé par Kermen (2018), nous utiliserons le terme « microscopique » dans la suite de ce travail pour désigner le niveau de savoir théorique propre à la chimie et identifié par Johnstone (1982).

Dans le contexte des recherches anglophones, les travaux de Talanquer (2011) et Taber (2013) vont critiquer et compléter ceux de Johnstone (1982, 1991, 1993, 2000).

Kermen (2018) indique que, si le triangle de Johnstone est repris dans les travaux francophones belges, il n'est pas vraiment considéré dans les travaux français jusqu'aux années deux-mille-dix. Dans ce contexte, la modélisation des savoirs en chimie place la focale sur le niveau microscopique, en particulier avec les travaux sur les conceptions des élèves à propos du modèle particulaire de la matière menés par Chomat et al. (1988) ; Larcher et al. (1994) dans le cadre du Laboratoire interdisciplinaire de recherches en éducation scientifique et technologique (LIREST) et de l'Institut national de la recherche pédagogique (INRP).

Enfin, certaines recherches s'intéressent particulièrement au niveau symbolique, dimension essentielle de la pratique de la chimie (Canac, 2017; Canac & Kermen, 2016; Dehon & Snauwaert, 2015, 2018; Jacob, 2001; Kermen, 2022; Kermen & Méheut, 2009; Laszlo, 1993; Mounin, 1981; Rees et al., 2018; Taber, 2013; Talanquer, 2011; Weninger, 1982). Pour certaines d'entre elles et eux (Jacob, 2001; Mounin, 1981; Rees et al., 2018; Weninger, 1982), le niveau symbolique propre à la chimie — c'est-à-dire l'association des noms des substances aux formules des molécules qui les composent — constitue une langue, dont la maîtrise nécessite d'apprendre son alphabet, son orthographe et sa grammaire. Pour Dehon et Snauwaert (2015, 2018) ; Canac et Kermen (2016) ; Canac (2017) ; Kermen (2022) ; Laszlo (1993) le niveau symbolique de la chimie constitue plutôt un langage au sens de de Saussure (1989), soit la capacité des êtres humains à utiliser une ou plusieurs langues en contexte<sup>21</sup>. Selon elles et eux, le

<sup>21</sup> Dès lors, le langage prend en charge l'usage de la langue.

langage de la chimie permet non seulement de communiquer, mais aussi de penser et de prédire. C'est pourquoi son apprentissage nécessite un processus de conceptualisation. Jaubert (2007) souligne que le langage devient objet d'apprentissage tout en étant un outil d'accès aux concepts. Pour cette autrice, toute la difficulté de l'apprentissage de la chimie se trouve dans le rapport savoir-langage. De plus, le langage symbolique de la chimie a ceci de spécifique que les noms et formules chimiques peuvent représenter à la fois les espèces chimiques qui réagissent et sont produites au niveau macroscopique, et les molécules qui les composent au niveau microscopique (Canac, 2017). Ainsi, l'équation de réaction chimique peut être interprétée aux deux niveaux du modèle. Cette dualité macroscopique-microscopique du langage de la chimie suppose un apprentissage du code, mais surtout de son usage en contexte (Kermen, 2022). À plus forte raison que l'enseignement de la chimie tend à renforcer l'interprétation des symboles comme représentations microscopiques de la matière (Canac & Kermen, 2016).

Tout en s'appuyant sur les travaux en épistémologie de la chimie, Kermen (2018) convoque des travaux plus génériques sur la modélisation en sciences, que nous allons maintenant présenter.

## 2.2.2 Deux cadres pour la modélisation en sciences et leurs déclinaisons en chimie

### 2.2.2.1 La modélisation en sciences selon Jean-Louis Martinand

Martinand (1998) identifie deux registres : le référent empirique et les modèles. Le référent empirique comprend des objets et des connaissances sur ces objets, les règles pour mener à bien la tâche (phénoménotechnique) et la représentation de la situation (phénoménographie) (Figure 9).

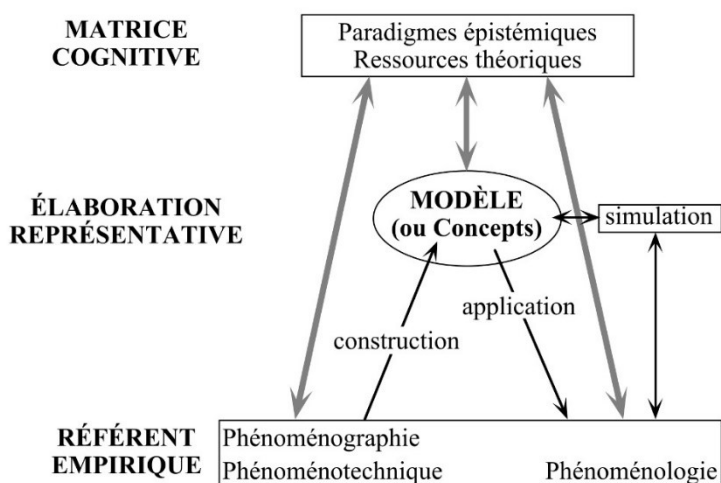


Figure 9 : schéma de la modélisation en science selon Martinand (1998, p. 10)

Dans une approche psychologique qui vise à faire construire le modèle par les élèves (Kermen, 2018), Martinand (1998) propose de distinguer au sein du registre des modèles la matrice cognitive et le niveau d'élaboration représentative. La représentation du modèle est en effet une tâche « décisive » du processus de modélisation (p. 8) et prend appui sur les paradigmes épistémiques et les ressources théoriques du domaine.

Le modèle proposé par Martinand (1998) est repris par Laugier et Dumon (2003) dans le cadre de l'enseignement-apprentissage de la chimie (Figure 10). Il s'agit, dans ce cas, de demander aux élèves de faire fonctionner un modèle enseigné comme tel, alors que la démarche de modélisation selon Martinand cherche à rendre les élèves acteurs et actrices de l'élaboration du modèle.

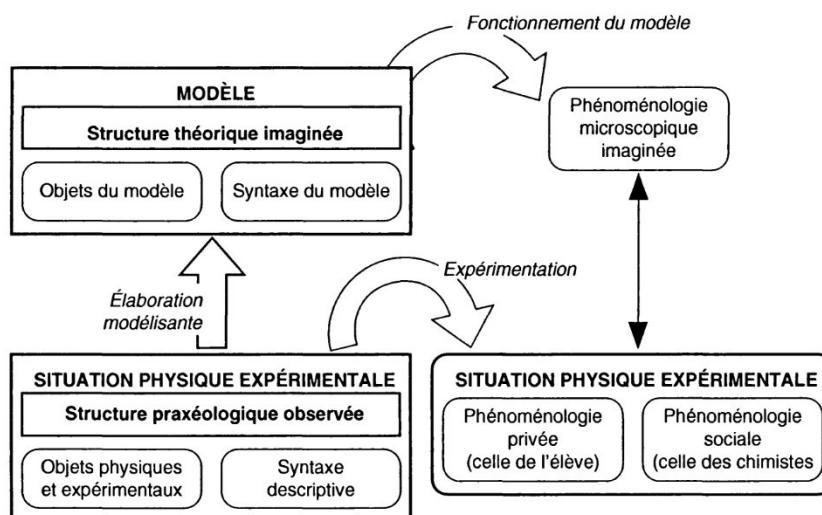


Figure 10 : schéma de la modélisation en chimie selon Laugier et Dumon (2003, p. 73)

Kermen (2018) souligne l'apparition d'un registre phénoménologique microscopique qui fait le lien entre la situation expérimentale et le fonctionnement du modèle. Elle pointe également l'ambiguïté de la distinction entre phénoménologie microscopique imaginée et phénoménologie sociale des chimistes. Le modèle proposé par Laugier et Dumon (2003) qui fait cohabiter à un même niveau savoirs des élèves et savoir expert<sup>22</sup> est alors difficilement mobilisable pour l'interprétation des situations.

#### 2.2.2.2 La modélisation en physique selon Andrée Tiberghien

Dans la *théorie des deux mondes* (Tiberghien, 1994; Tiberghien et al., 1994; Tiberghien & Vince, 2005), Andrée Tiberghien propose un modèle qui met en relation monde des objets et des événements, et monde des théories et des modèles, et prend explicitement en charge les niveaux de savoirs des élèves et de savoir expert (Figure 11).

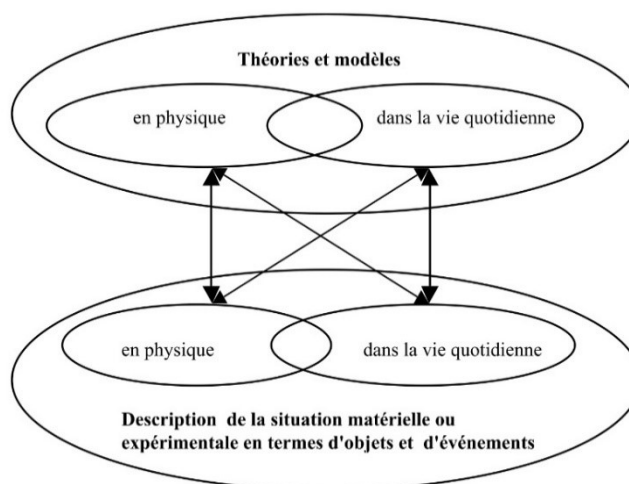


Figure 11 : schéma de la modélisation en physique selon Tiberghien et Vince (2005).

Si on retrouve dans la théorie des deux mondes, la distinction entre registre empirique et registre des modèles repérée précédemment dans le modèle de Martinand (1998) (cf. 2.2.2.1), Tiberghien et

<sup>22</sup> Cf. Chapitre 5 pour les définitions de savoir savant, savoir expert et savoir de référence.

Vince (2005) semblent définir le monde empirique par les phénomènes observables (objets et événements) et leur description, sans faire intervenir les savoirs théoriques à ce niveau. Le processus de modélisation est possible par la dialectique entre les deux mondes, et en particulier par la mise en relation des expériences quotidiennes avec les savoirs physiques, des expériences en physique avec les savoirs quotidiens, et réciproquement.

Les travaux de Le Maréchal (1999a, 1999b; Le Maréchal & Bécu-Robinault, 2006; Pekdağ & Le Maréchal, 2001) proposent une extension de la théorie des deux mondes en chimie. Cet auteur distingue en chimie le monde *perceptible* du monde *reconstruit* que Kermen (2018) rapproche respectivement du monde des objets et des événements, et du monde des théories et des modèles (Tiberghien, 1994; Tiberghien et al., 1994; Tiberghien & Vince, 2005).

Le modèle le plus récent proposé par Le Maréchal et Bécu-Robinault (2006) (Figure 12) ne propose pas de distinction explicite entre les objets macroscopiques et microscopiques, comme la majorité des travaux en épistémologie de la chimie le font depuis Johnstone (1982). De plus, la présence du monde reconstruit a le mérite de mettre en évidence le travail d'abstraction inhérent à la modélisation en chimie. Cependant, le rapport entre empirie et théorie est moins explicite que dans les modèles de Martinand (1998) ou Tiberghien et Vince (2005), dimension pourtant constitutive de l'activité des chimistes (Kermen, 2018).

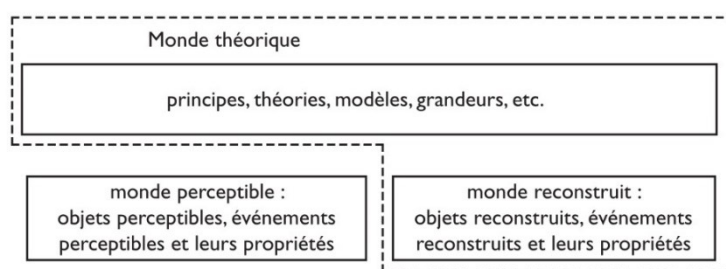


Figure 12 : schéma de la modélisation en chimie selon Le Maréchal et Bécu-Robinault (2006, p. 86)

Considérant les apports et les manques de l'ensemble de ces travaux en épistémologie de la chimie et à propos de la modélisation, Kermen (2018) élabore un modèle épistémologique relatif à l'enseignement de la transformation chimique au lycée (secondaire II en France).

### 2.2.3 Spécificités du modèle épistémologique de la transformation chimique au lycée

Le schéma de modélisation des transformations chimiques de Kermen (2018) spécifie la théorie des deux mondes (Tiberghien, 1994; Tiberghien et al., 1994; Tiberghien & Vince, 2005) en distinguant un niveau expérimental d'un niveau des modèles, tout en intégrant les mondes perceptible et reconstruit (Le Maréchal & Bécu-Robinault, 2006; Pekdağ & Le Maréchal, 2001). Kermen (2018) revendique l'inspiration du modèle de Martinand (1998) pour organiser le niveau des savoirs idéalisés au niveau expérimental — en faisant référence à la phénoménographie. La description au niveau idéalisé n'ayant, selon cette autrice, ni pouvoir explicatif, ni pouvoir prédictif, elle n'est donc pas placée du côté du modèle<sup>23</sup> au niveau de l'enseignement secondaire, nous y reviendrons. De plus, Kermen (2018) choisit délibérément de ne pas distinguer savoirs experts et savoirs des élèves, à l'inverse de Tiberghien et Vince (2005). Enfin, le niveau des modèles se déploie aux échelles macroscopique et microscopique, selon la

<sup>23</sup> Soler (2013), en s'appuyant notamment sur l'étude de Drouin (1988), identifie plusieurs fonctions au modèle en science et technologies : expliquer, comprendre, interpréter et prédire (p. 186).

spécificité épistémologique des savoirs en chimie (Johnstone, 1982, 1991, 1993, 2000; Taber, 2013; Talanquer, 2011).

Le niveau des représentations, central dans le modèle de Martinand (1998) et constituant un registre à part entière, en relation avec les autres dans les travaux de Johnstone (1982, 1991, 1993, 2000); Talanquer (2011); Kermen et Méheut (2009), est ici intégré aux différents niveaux du modèle. En effet, à l'instar de Canac (2017), Kermen (2018) considère le registre symbolique comme un *métaniveau*, intervenant à tous les niveaux du modèle puisque les systèmes de représentation permettent de décrire la situation observée à un niveau abstrait nécessaire à la conceptualisation. Ce métaniveau demande un apprentissage spécifique, en relation avec celui des concepts (cf. 2.2.1). Aussi, si le registre symbolique apparaît explicitement au niveau du modèle macroscopique avec l'évocation des équations de réaction chimique, les noms des espèces chimiques interviennent également au niveau de la réalité idéalisée, de même que les formules des molécules et les symboles des atomes sont nécessaires pour penser le modèle au niveau microscopique (Figure 13).

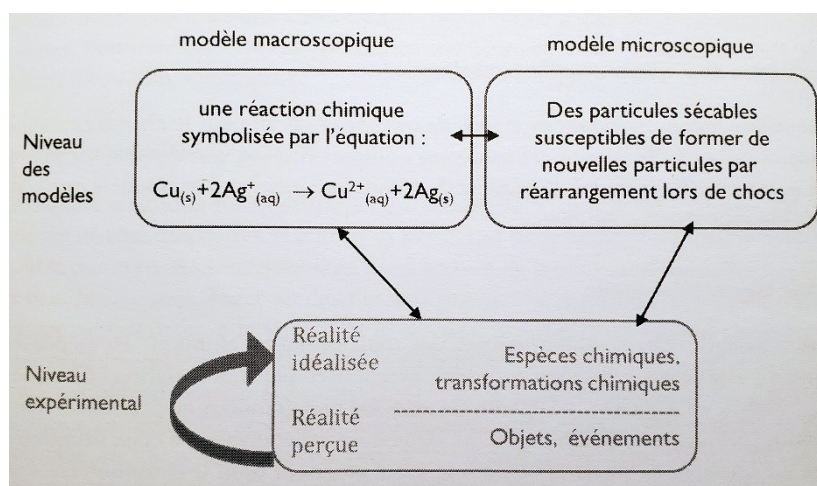


Figure 13 : schéma de la modélisation des transformations chimiques au lycée selon Kermen (2018, p. 57)

Pour étudier la prise en charge de cette dualité dans les situations d'enseignement-apprentissage de la chimie, Kermen (2022) propose un outil issu de la sémiotique de Charles Sanders Peirce : la relation triadique qu'entretiennent objet, signe et interprétant. Kermen (2022) explique que tout objet (matériel ou conceptuel) entretient une relation sémiotique — c'est-à-dire constructrice de sens — avec un signe qui permet de le percevoir et la signification ou interprétation qu'il en découle (p. 58) (Figure 14).

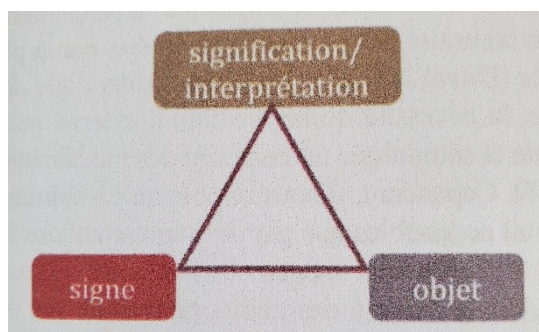


Figure 14 : relation sémiotique triadique, d'après Kermen (2022, p. 58)

Dans le cas des noms et des formules chimiques, leur double signification, à la fois au niveau macroscopique et au niveau microscopique du modèle, conduit à l'élaboration de deux relations

sémiotiques différentes pour un même objet. Dès lors, l'apprentissage de la chimie consistera en partie à transmettre les codes de l'interprétation d'un signe (le nom ou la formule chimique) comme un objet macroscopique (une substance) ou microscopique (des molécules), en fonction du contexte. Par exemple, le nom « méthane » ou la formule associée « CH<sub>4</sub> » peut faire référence à l'espèce chimique ou aux molécules qui la composent. Ceux-ci peuvent s'interpréter, au niveau macroscopique comme un gaz incolore, au niveau microscopique comme une molécule contenant un atome de carbone et quatre atomes d'hydrogène (Figure 15).

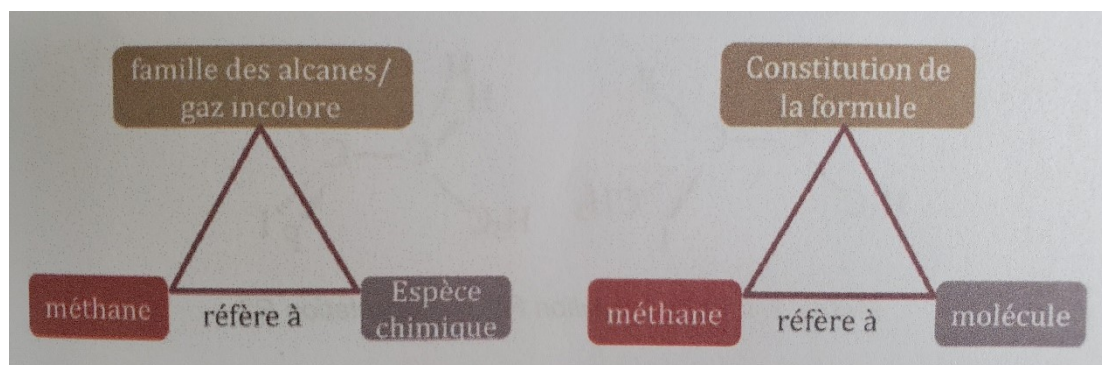


Figure 15 : double relation sémiotique pour le nom chimique « méthane », d'après Kermen (2022, p.65)

De plus, on voit dans le schéma de modélisation des transformations chimiques proposé par Kermen (2018) que la transformation chimique est distinguée de la *réaction chimique*. La première, considérée comme une « création didactique facilitant l'accès au modèle pour les élèves » (Kermen, 2018, p. 63), est en effet placée au niveau expérimental, plus précisément au niveau de la réalité idéalisée. Il s'agit de décrire les objets et les événements observés au niveau de la réalité perçue (un changement de couleur, de pH, la formation d'un solide ou d'un gaz) comme un phénomène chimique : une *transformation chimique*. Le niveau de la réalité idéalisée fait alors intervenir des concepts chimiques pour décrire les phénomènes. Par exemple, dans la combustion d'un morceau de charbon<sup>24</sup>, la première description au niveau de la réalité perçue consiste à repérer la disparition du charbon une fois la réaction terminée. La description au niveau de la réalité idéalisée demande d'interpréter l'absence de substance solide à l'état final comme sa transformation en un gaz, qu'il s'agira ensuite d'identifier au niveau du modèle.

Dans l'enseignement de la chimie au lycée, la réaction chimique se situe au niveau du modèle macroscopique. Les espèces chimiques identifiées au niveau de la réalité idéalisée sont désignées par leurs formules chimiques. Le phénomène observé expérimentalement est alors modélisé par une équation de réaction qui rend compte des espèces chimiques présentes dans le système à l'état initial et à l'état final. Pour comprendre les détails du processus de la réaction, il faut faire appel au niveau microscopique du modèle, qui considère les espèces chimiques comme constituées d'entités sécables susceptibles de se combiner par chocs. Pour expliquer et prédire ces phénomènes, le modèle prend appui sur un niveau théorique composé des lois de la thermodynamique et de la cinétique (Figure 16).

<sup>24</sup> Une remarque à propos du langage de la chimie : rien que dans la description de cette transformation, nous avons utilisé le nom vernaculaire de la substance « charbon » qui fait référence à l'expérience quotidienne et suppose de considérer le charbon comme essentiellement composé de carbone (réalité idéalisée). En effet, la modélisation de cette transformation au secondaire correspond à la réaction de combustion du carbone. Il nous semble que le choix de l'une ou l'autre de ces dénominations dépend du niveau de modélisation convoqué : charbon au niveau expérimental, carbone au niveau du modèle.

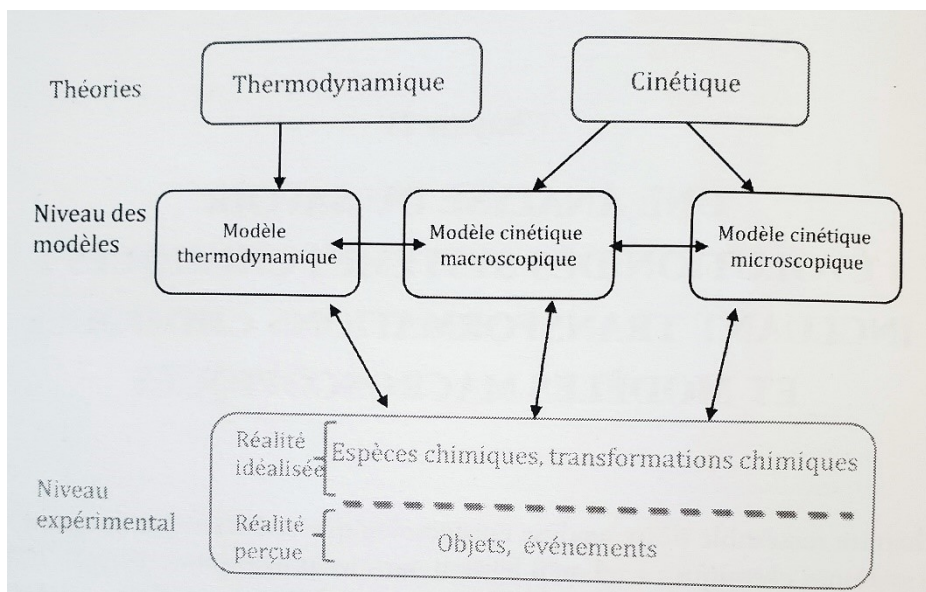


Figure 16 : schéma de la modélisation de l'évolution des systèmes chimiques au lycée selon Kermen (2018, p. 52)

Pour finir, rappelons que le modèle d'organisation des savoirs proposé par Kermen (2018) concerne l'enseignement de la chimie au secondaire II en France (lycée). À ce titre, il consiste en un état de la transposition didactique, centré sur une étude du savoir savant vers le savoir à enseigner — transposition didactique externe (cf. 1.3). C'est également la perspective adoptée par Taber (2020) qui propose une critique des curricula de chimie britanniques à la lumière de l'organisation du savoir savant.

Cette remarque interroge le statut de l'épistémologie de la chimie scolaire vis-à-vis de la discipline académique « chimie », et des modèles qui peuvent être produits dans ces différents contextes institutionnels. À ce propos, Harré (2008) adopte une perspective historique pour décrire l'élaboration du concept de réaction chimique et discuter les fondements épistémologiques de la chimie. En particulier, les modèles « métaphysiques » de la chimie développés entre les XVII<sup>e</sup> et XIX<sup>e</sup> siècles par Robert Boyle, Humphry Davy et Michael Faraday. Harré (2008) montre, par exemple, en quoi le modèle corpusculaire de Boyle et la chimie dynamique de Davy inspirée par Roger Boschovich, étaient en leurs temps particulièrement pertinents pour interpréter les phénomènes expérimentaux observables à un niveau microscopique, alors que le modèle de Faraday entraînait en contradiction avec le principe corpusculaire de la matière alors établi à l'époque.

Johnstone (1982), que nous avons cité précédemment, s'intéresse quant à lui à l'organisation des savoirs au niveau des pratiques des chimistes en faisant l'hypothèse que l'articulation entre macroscopique, submicroscopique et symbolique se retrouve transposée dans l'enseignement de la discipline.

En ce qui nous concerne, nous tentons une étude ascendante de la transposition didactique. Pour cela, nous nous intéressons à l'organisation du savoir telle qu'elle se développe dans les pratiques d'enseignement-apprentissage en classe (transposition didactique interne), éclairée par les concepts fondateurs de l'épistémologie de la chimie — la distinction macroscopique-microscopique et la relation phénomène expérimental-modèle — et essayons de remonter vers un modèle d'organisation des savoirs.

## 2.3 Analyse épistémologique : ce que la transformation chimique permet de comprendre au début du secondaire

### 2.3.1 Modéliser la transformation chimique au secondaire I : vers un modèle épistémologique des savoirs

En France, le thème « Organisation et transformations de la matière » est au programme de physique-chimie du cycle 4. L'enseignement du concept de transformation chimique est prescrit à partir de la classe de 4<sup>e</sup> (élèves de 13-14 ans)<sup>25</sup>. En fin de 3<sup>e</sup>, il est attendu des élèves de savoir « Décrire et expliquer une transformation chimique », notamment en l'interprétant « comme une redistribution des atomes ». Mais aussi d'« utiliser une équation de réaction chimique fournie pour décrire une transformation chimique observée » (Ministère de l'Education nationale, de la jeunesse et des sports, 2020, p. 98).

En Suisse romande, le Plan d'études romand (PER) prescrit l'enseignement du concept de transformation chimique au cycle 3, dans le chapitre intitulé « Matière » de la thématique « Phénomènes naturels et techniques »<sup>26</sup>. Le PER demande que l'élève soit capable de « modéliser des transformations chimiques par des réactions chimiques (équation chimique) » et de comprendre « le principe de conservation de la matière par celle des atomes en utilisant le modèle de la réaction chimique, pour des cas simples, en se limitant à quelques combustions » (CIIP, 2010d, p. 40).

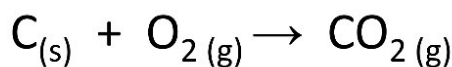
Les prescriptions du secondaire I de ces deux institutions proposent la mise en œuvre d'une première modélisation des transformations de la matière au niveau de la réalité idéalisée (le programme de cycle 4 français demande de « décrire les transformations »), mais surtout à un niveau microscopique. En effet, le programme français comme le PER insistent sur la modélisation de la transformation chimique par le principe de conservation des atomes ou « redistribution d'atomes ».

Pour Kermen (2018), le passage d'une description de la réalité perçue au niveau de la réalité idéalisée apparaît comme central au commencement de l'enseignement de la chimie. Cette dimension du modèle paraît en effet la clef de voûte du curriculum de chimie du secondaire I. La lecture des prescriptions officielles nous permet d'identifier un autre point d'articulation fondamental : la maîtrise d'un système symbolique — l'équation de réaction — pour modéliser les phénomènes observés expérimentalement.

Bilan de la  
transformation  
*Réalité idéalisée*

carbone + dioxygène → dioxyde de carbone

Équation de réaction  
*Modèle macroscopique*



Équation de réaction  
*Modèle microscopique*

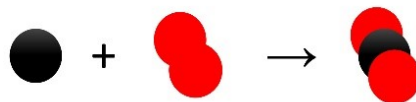


Figure 17: modélisation de la combustion du carbone au secondaire I

Aussi, l'interprétation de la réaction chimique à la fois au niveau symbolique par l'écriture de l'équation de réaction et au niveau microscopique par le principe de conservation des atomes tend implicitement à proposer une lecture microscopique de l'équation de réaction chimique (Figure 17), en contradiction avec ce qui est pratiqué au lycée (Kermen, 2018) (cf. Figure 13), mais aussi avec l'histoire de la chimie.

<sup>25</sup> Pour une comparaison des systèmes scolaires français et suisse-romand, consulter l'annexe 2.

<sup>26</sup> Nous reviendrons en détail sur l'organisation des savoirs en différentes disciplines de ces deux systèmes scolaires dans le Chapitre 3.

En effet, le principe de conservation de la matière a été formulé par Antoine Lavoisier à un niveau macroscopique suite à la mise en évidence expérimentale de la conservation de la masse (Canac, 2017).

On observe au secondaire I une rupture épistémologique qui se caractérise par une modélisation du phénomène expérimental directement au niveau microscopique, à partir du niveau de la réalité idéalisée. On demande alors aux élèves d'interpréter le phénomène observé, accessible aux sens, à l'aide d'objets abstraits (les atomes et les molécules), sans passer par l'intermédiaire d'un modèle macroscopique qui permet de faire le bilan des quantités d'espèces chimiques réactives et produites. Il semblerait que ce positionnement épistémologique se rapproche de celui pratiqué en biologie, discipline dans laquelle les objets microscopiques sont observables par l'intermédiaire du microscope<sup>27</sup> et modélisés sans intervention d'un niveau d'abstraction.

À ce propos, Kermen (2018) souligne le fait qu'au début de l'enseignement de la chimie :

Les concepts d'espèce chimique et de transformation chimique sont alors des abstractions dont le caractère empirique n'est pas encore établi, il le sera par l'habitude comme l'indique Martinand (1992), lorsqu'ils seront utilisés de façon routinière pour décrire chimiquement les changements observés, ce qui constitue la construction du référent empirique (ou niveau expérimental) [Chomat et al. 1988]. Comme il a été écrit précédemment, la réalisation d'expériences de même nature, mais fournissant des résultats perceptibles différents (par exemple, la présence de cuivre ou pas, voir la note 5) doit servir de levier pour faire la différence entre le concept de transformation chimique (totale) et celui de réaction chimique. (p. 63-64)

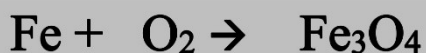
Dès lors, espèce chimique et réaction chimique ne sont pas définies au secondaire I, sinon « en acte ». Le concept d'espèce chimique (niveau expérimental et niveau des modèles) n'apparaît même pas dans les prescriptions du PER, au profit du concept de substance (niveau expérimental).

De plus, le modèle macroscopique n'est présent que dans le cas particulier de la mise en évidence expérimentale de la conservation de la masse au cours de la réaction chimique. L'équation de réaction est alors rédigée — ou représentée par un modèle matériel composé des billes et de tiges — pour aider les élèves à interpréter ce constat expérimental par le principe de conservation des atomes. Ce dernier étant apporté par l'enseignant ou l'enseignante, qui définit la transformation chimique comme une modification des molécules, en opposition à la transformation physique. Tout se passe comme si le niveau de la réalité idéalisée consistait en un premier niveau de modélisation — macroscopique — à la fois dépourvu des aspects de quantification des espèces et de l'équation de réaction. Cette dernière est rédigée au niveau microscopique, par dénombrement des atomes impliqués dans la réaction, à partir des formules des molécules composant les espèces chimiques réactives et du principe de conservation des atomes, donnés par l'enseignant ou l'enseignante (Figure 18).

---

<sup>27</sup> Cf. section 2.2.1 à propos de la définition de « microscopique ».

### 9.3 Combustion du fer (Fe)



**Remarques :**

*Le gain de matière (cf. augmentation de la masse lors de la combustion) est dû aux atomes d'oxygène présents au départ dans l'air ambiant et qui se lient aux atomes de fer.*



Figure 18 : extrait d'un document de cours à destination des élèves élaboré par un enseignant genevois

Dans la démarche de modélisation pragmatique que nous adoptons — c'est-à-dire non plus issue de l'analyse a priori de la nature des savoirs, mais de l'étude de la fonction occupée par ces savoirs en classe, dans un premier temps à partir d'une étude de la transposition didactique externe puis à partir de l'observation des pratiques (cf. Chapitre 9 et Chapitre 10) —, nous faisons l'hypothèse que le niveau de réalité idéalisée prend la fonction de modèle dans l'enseignement au secondaire I. Nous rappelons que Kermen (2018) argumente la distinction entre niveau expérimental et niveau du modèle notamment à partir des critères d'explication et de prédiction, caractéristiques de ce dernier et absents dans la pratique de la chimie au lycée<sup>28</sup>. Cependant, en reprenant l'exemple de la combustion du carbone introduit dans la partie précédente, nous considérons que l'interprétation de la disparition de la substance solide présente au départ comme la manifestation de la production d'un gaz au cours d'une transformation chimique, demande de mobiliser des éléments théoriques — le principe de conservation de la matière en particulier — et consiste plutôt à une interprétation qu'à simplement décrire la situation expérimentale. Il semblerait qu'une première étape de modélisation se joue dans l'identification de la composition du solide noir. Le réel est simplifié par la focalisation sur une des caractéristiques de la substance observée : elle est majoritairement composée de carbone.

Aussi, nous venons de montrer que la définition expérimentale de la transformation chimique est une abstraction au début de l'apprentissage de la chimie, qu'elle n'existe que lorsque l'enseignant ou l'enseignante désigne le phénomène observé comme tel (Kermen, 2018).

L'ensemble de ces constats nous conduit à proposer un schéma légèrement modifié pour la modélisation des transformations chimiques au secondaire I, issu de notre réflexion épistémologique pragmatique, inférée à partir de la fonction occupée dans la classe par le savoir à enseigner. Le modèle que nous proposons (Figure 19) est issu d'un processus de transposition « inversé » : du savoir enseigné au savoir savant. Par cette approche, nous cherchons à cartographier le fonctionnement des savoirs de la chimie au secondaire I en nous appuyant sur les prescriptions officielles et la distinction entre le niveau expérimental et le niveau des modèles (macroscopique et microscopique) constitutifs de la pratique de la chimie (cf. 2.2).

<sup>28</sup> Secondaire II en France.

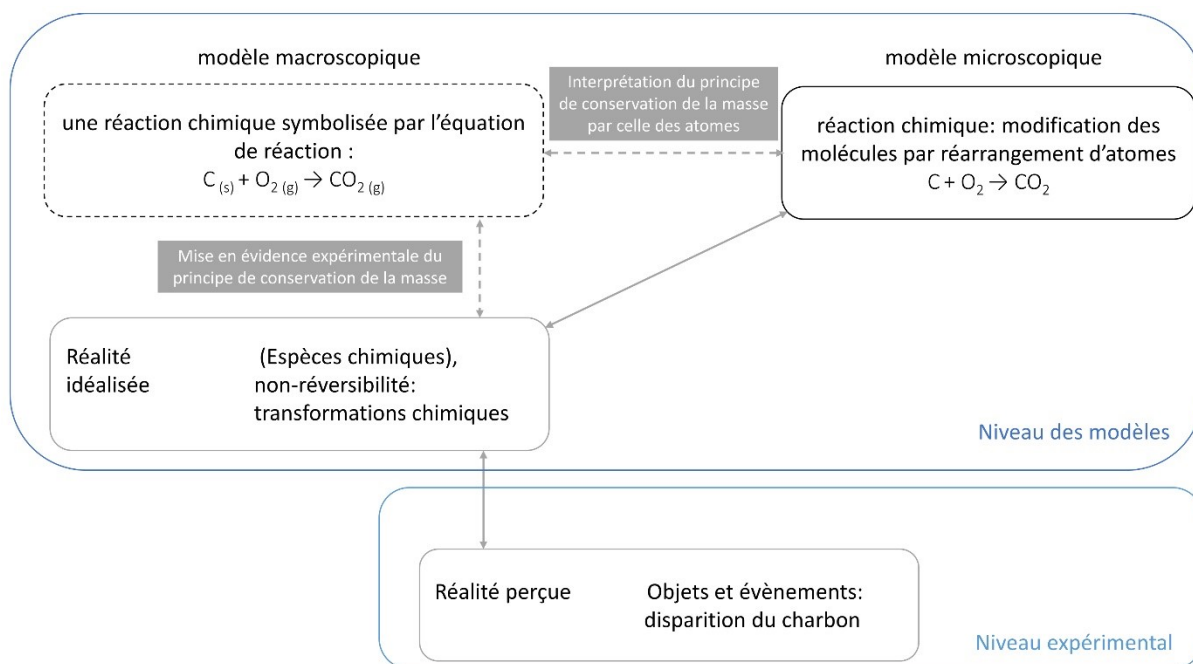


Figure 19 : schéma de la modélisation de la transformation chimique au secondaire I

### 2.3.2 Un exemple de transformation chimique étudié au secondaire I : la combustion du carbone

Notre revue de littérature sur les travaux en didactique à propos de la transformation chimique a mis en évidence huit études concernant les combustions (cf. 2.1.3.2). Cette famille de transformations chimiques est également citée dans les prescriptions officielles. Le programme français de cycle 4 la cite comme un exemple d'activité expérimentale à mettre en œuvre avec les élèves. Le PER en fait l'exemple prototypique pour introduire la modélisation en chimie en proposant de se limiter à l'étude des combustions du carbone, de l'hydrogène, du méthane et du fer. Il semblerait que ces expériences soient assez faciles à mettre en place en classe et donc plutôt accessibles pour les élèves novices en chimie. De plus, les espèces chimiques impliquées dans ces réactions sont composées d'un petit nombre d'éléments chimiques, connus des élèves de secondaire I : le carbone, l'hydrogène, l'oxygène, le fer, facilitant la description de la situation expérimentale par l'écriture de l'équation de réaction. D'autant plus que la combustion implique toujours le dioxygène comme réactif. La détermination des produits d'une combustion inconnue pourrait donc être plus aisée, après étude de plusieurs réactions de cette famille.

En outre, nous voyons dans le cas de la combustion du carbone<sup>29</sup> le potentiel pour un autre type d'apprentissage dans le cadre de la chimie : la réflexion à propos des problèmes environnementaux. Car si l'expérience de combustion d'un morceau de charbon — considéré comme étant majoritairement composé de carbone — dans une bonbonne remplie de dioxygène, suivie des tests de la bûchette incandescente et de l'eau de chaux<sup>30</sup> (Figure 20) fournit sans aucun doute un exemple d'activité expérimentale qui se prête facilement à la modélisation de la transformation chimique, sa

<sup>29</sup> Nous prenons ici l'exemple de la combustion du carbone pour sa facilité de mise en œuvre expérimentale en classe, mais cet argumentaire est valable pour toute substance carbonée utilisée dans le cadre des activités humaines industrielles, appelées « combustibles fossiles », « énergies fossiles » ou encore « ressources fossiles » dans le langage courant et dans les médias. La combustion du méthane est un autre exemple transposable à la classe de chimie.

<sup>30</sup> Tests d'identification des substances enseignés au secondaire I. Le test de la bûchette incandescente permet de révéler la présence de dioxygène dans le cas où la flamme est ravivée. L'eau de chaux se trouble en présence de dioxyde de carbone.

recontextualisation dans le cadre des activités humaines industrielles et domestiques pose la question des conséquences de ces activités sur l'environnement.

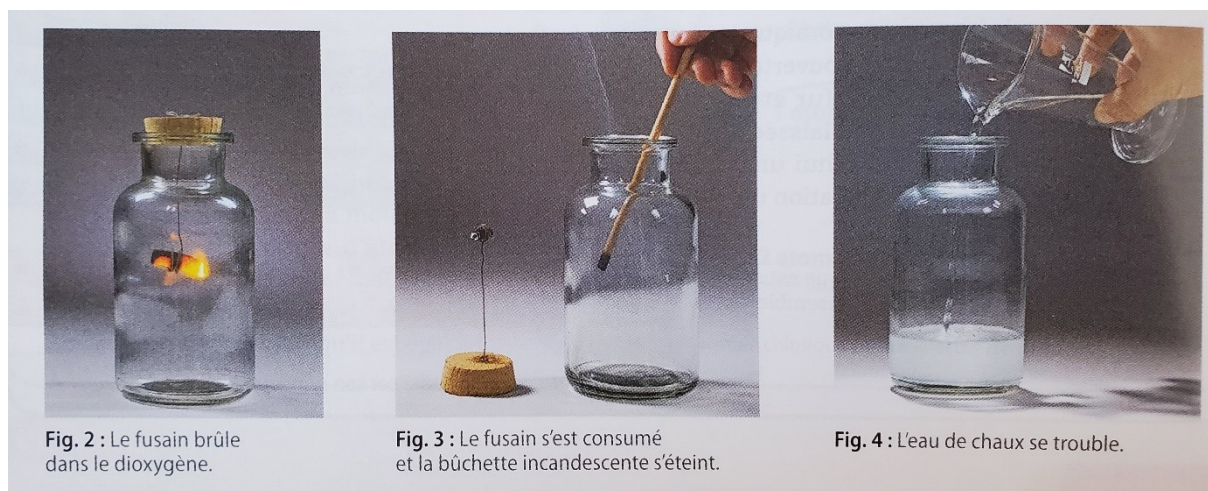


Figure 20 : illustration de la mise en évidence expérimentale des produits de la combustion du carbone dans un manuel (Daujean, 2017, p. 160)

2.3.3 Le potentiel de la transformation chimique pour enseigner les problèmes environnementaux  
Considérant le fait que de telles combustions produisent du dioxyde de carbone, gaz à effet de serre (GES), leur étude — en particulier une réflexion à propos des quantités de GES avant et après la révolution industrielle — permet d'aborder la question du réchauffement climatique en classe de chimie.

Pour cela, l'exploitation des substances carbonées dans le cadre des activités humaines (centrales à charbon, combustion des déchets, combustion du pétrole au service de la mobilité, déforestation, etc.) doit être modélisée comme un ensemble de réactions chimiques et mise en relation avec le concept d'effet de serre. Pour comprendre l'origine anthropique des GES, il est nécessaire de mobiliser le principe de conservation de la matière pour identifier que la substance formée, le dioxyde de carbone, provient de la réaction des substances naturelles exploitées par l'être humain et contenant l'élément carbone, et du dioxygène présent dans l'air. De plus, le caractère néfaste pour l'environnement des GES n'intervient qu'à partir d'une certaine concentration dans l'atmosphère, concentration qui ne peut plus être compensée par les réactions chimiques consommant du dioxyde de carbone — la photosynthèse et l'absorption par les océans. Il s'agit donc d'opérer une réflexion à un niveau macroscopique sur les quantités et la nature des substances consommées et produites à l'échelle de la planète.

## 2.4 Conclusion du chapitre

Nous avons commencé ce chapitre par un état de l'art des recherches en didactique à propos de la transformation chimique. Cette revue de deux cent huit publications internationales montre une focalisation des recherches sur des méthodes pour enseigner la transformation chimique (22 %), sur le processus de conceptualisation des élèves (19 %) ou sur leurs conceptions relatives au concept (19 %). Cette étude relève également un certain nombre de travaux (8 %) qui s'intéressent à l'épistémologie de la chimie et proposent des modèles d'organisation des savoirs.

Dans une perspective réaliste, Kermen (2018) propose une modélisation des transformations chimiques au lycée qui articule niveau expérimental et niveau des modèles, réalité perçue et réalité idéalisée, modélisation macroscopique et microscopique. Nous reprenons ce modèle qui fait la synthèse d'un

ensemble de travaux antérieurs à propos de l'épistémologie de la chimie et de la modélisation, afin de l'adapter à la modélisation de la transformation chimique au début du secondaire. En effet, dans les deux contextes francophones que nous étudions, la transformation chimique et l'équation de réaction sont introduites dès le secondaire I. À ce niveau du curriculum, une interprétation de l'équation de réaction au niveau microscopique est suggérée, en contradiction avec la modélisation enseignée au secondaire II décrite par Kermen (2018).

Cette remarque nous conduit à revoir le modèle proposé par cette autrice pour l'adapter à l'enseignement de la chimie au secondaire I. À partir d'une étude des curricula de chimie du secondaire I, nous cherchons à comprendre quelle fonction les concepts peuvent occuper au sein de la classe de chimie. Cette construction ascendante de la transposition didactique nous permet de formuler l'hypothèse selon laquelle la réalité idéalisée fonctionne comme un modèle à ce niveau d'enseignement de la chimie. Ce modèle élaboré de façon pragmatique — à partir d'observations empiriques — met en évidence une rupture épistémologique à ce niveau du curriculum de chimie, qui s'exprime notamment à travers une lecture microscopique de l'équation de réaction. Nous pouvons faire l'hypothèse que la bascule d'une épistémologie à une autre à l'entrée du secondaire II pose un certain nombre de difficultés pour les élèves dans le processus de conceptualisation. Difficultés qui pourraient expliquer la persistance des conceptions à la fin du secondaire II, comme nous le rapportent nombre de publications de notre revue de littérature (cf. 2.1.3). La mise en relation du niveau expérimental et du niveau du modèle (réalité idéalisée) pourrait aussi constituer un *concept seuil* au sens de Meyer et al. (2010)<sup>31</sup> et ainsi poser les fondements de la modélisation en chimie, sans lesquels l'élaboration des savoirs de la discipline s'avèrera périlleuse sinon impossible.

Enfin, en appui sur les prescriptions officielles françaises et suisse-romandes, nous mettons en évidence le potentiel de l'enseignement de la chimie au secondaire I pour construire une culture scientifique et technique (cf. Chapitre 1), notamment en abordant l'origine anthropique du réchauffement climatique. Nous montrerons dans le chapitre suivant (Chapitre 3) qu'une telle réflexion demande de mobiliser des savoirs abordés dans le cadre de disciplines scolaires différentes. À ce stade de notre travail, la question de l'insertion des problèmes environnementaux dans les curricula de chimie est celle qui nous anime. Elle fera l'objet du chapitre 3.

---

<sup>31</sup> « Threshold concept », notre traduction.

## CHAPITRE 3 — L'INSERTION DES PROBLÈMES ENVIRONNEMENTAUX DANS L'ENSEIGNEMENT DE LA CHIMIE

*Le contenu de ce chapitre a fait l'objet de deux articles, l'un paru dans la Revue suisse des sciences de l'éducation (Sudriès et al., 2023), l'autre dans la revue Recherches en didactique des sciences et technologies (Sudriès & Cross, sous presse).*

Nous avons montré dans le chapitre précédent (Chapitre 2) qu'à l'instar des autres disciplines scientifiques scolaires, la chimie est à même de prendre en charge les problèmes environnementaux, car elle offre un ensemble de concepts et de modèles qui permettent d'en comprendre les enjeux, de les expliquer et de participer à leur résolution.

Dans plusieurs contextes francophones, dont la France et la partie romande de la Suisse, les réformes de l'enseignement n'atteignent pas la structure même de l'École, organisée selon une logique disciplinaire, sur le modèle des disciplines académiques de référence — en particulier au secondaire.

Martinand (2016) critique alors les conditions d'enseignabilité des problèmes environnementaux<sup>32</sup> dans le concert des disciplines scolaires. Notamment parce que la complexité des problèmes environnementaux, par définition, implique plusieurs points de vue : scientifique, social, économique, technique, culturel, politique, etc., qui possèdent leurs propres épistémologies. Dans ce contexte, nous nous interrogeons sur l'intégration des problèmes environnementaux dans les curricula de chimie.

Dans ce chapitre, nous montrons tout d'abord quelques résultats de recherches internationales qui concernent les enjeux confiés à l'enseignement scientifique. S'intéresser à l'enseignement de la chimie demande de replacer l'enseignement de cette discipline scientifique scolaire dans le contexte des enjeux de l'enseignement des sciences en général ; cette courte revue de littérature nous permet donc d'en dessiner les contours. Nous présentons ensuite les résultats de la littérature internationale qui concernent spécifiquement les enjeux des curricula de chimie, ainsi qu'un certain nombre d'études qui proposent des pistes pour intégrer les problèmes environnementaux à l'enseignement de la chimie. Nous terminons cette première partie par l'étude de deux curricula francophones : en France et en Suisse romande. La seconde partie s'intéresse aux pratiques d'enseignement en chimie relatives à l'intégration des problèmes environnementaux. Après une étude de la littérature internationale, nous présentons les résultats de notre enquête par questionnaire des pratiques d'enseignantes et d'enseignants français.

### 3.1 À propos des curricula

#### 3.1.1 Curricula de sciences

##### 3.1.1.1 Enseigner les sciences à l'école : instruire et éduquer

Dans les pays anglophones et au nord de l'Europe, la question d'un curriculum de sciences qui transcende les limites des disciplines scolaires est étudiée depuis plusieurs dizaines d'années. Par

---

<sup>32</sup> L'article auquel nous faisons référence traite plus spécifiquement d'« une éducation populaire au développement durable ». Nous choisissons ici de lui assimiler l'idée de l'enseignement des problèmes environnementaux. En effet, nous considérons dans cet article l'« Éducation au développement durable » telle que définie par le ministère de l'Éducation nationale et ne faisons pas référence au champ de recherches des « Éducatrices à... ». Nous reviendrons sur ce choix terminologique dans la section 3.2.3.

exemple, les travaux de Roberts (1982) mettent l'accent sur sept dimensions<sup>33</sup> qui orientent les curricula de sciences nord-américains : applications à la vie quotidienne ; fonctionnement de la science ; science, technologie et société ; la démarche scientifique ; la science source de savoirs ; penser par soi-même et socle de connaissances.

Les travaux de Fensham (1988) identifient deux orientations pour l'éducation scientifique : l'introduction aux sciences et l'apprentissage par les sciences<sup>34</sup>. Ces deux orientations se définissent par un changement de posture du sujet enseignant, qui, dans le premier cas, transmet « sa science » — les savoirs conceptuels — aux élèves alors que, dans le second cas, il aménage des situations propices aux apprentissages dans lesquelles les élèves sont acteurs et actrices de la construction de connaissances potentiellement transférables aux situations de la vie quotidienne.

En Allemagne, van Berkel (2005) simplifie la catégorisation établie par Roberts (1982) en rapprochant certaines dimensions du curriculum pour n'en garder que trois principales : fondements théoriques ; science, technologie et société ; histoire et épistémologie des sciences.

En France, Martinand (2000) identifie quant à lui quatre « missions fondamentales de l'éducation scientifique et technologique » (paragr. 17) :

- familiariser les élèves avec les objets et les méthodes propres aux sciences et technologies ;
- transmettre des outils qui permettent de penser la complexité et la diversité du monde ;
- familiariser les élèves aux modèles et aux langages spécifiques ;
- transmettre une forme de raisonnement qui permet de critiquer, décider, agir et débattre.

Enfin, Roberts (2007) ; Roberts et Bybee (2014) identifient deux visions de l'enseignement scientifique promues par les curricula. La vision I concerne l'enseignement et l'apprentissage des concepts, modèles et méthodes spécifiques d'une discipline scientifique. En formant les élèves à une démarche qui permet de comprendre les phénomènes qui les entourent, la vision I cherche à former les scientifiques de demain. La vision II est plutôt orientée vers la formation de citoyens et citoyennes éclairés. Ainsi, dans la vision II, les savoirs et modèles disciplinaires sont orientés vers l'étude de situations complexes (Morin, 1982), qui doivent contribuer à la prise de décisions.

Nous proposons de mettre en perspective les dimensions du curriculum de sciences proposées par Roberts (1982) et van Berkel (2005) avec les missions décrites par Martinand (2000), les orientations décrites par Fensham (1988) et les visions de l'éducation scientifique de Roberts (2007) ; Roberts et Bybee (2014). Pour cela, nous reportons ces études dans les lignes d'un tableau selon un ordre chronologique (Tableau 2). Le découpage des colonnes met en perspective les différentes dimensions/missions/orientations/visions des curricula de sciences. Ainsi, une lecture en colonne permet de rapprocher les dimensions/missions/orientations/visions décrites par des auteurs différents, mais dont le sens peut, selon nous, être rapproché.

---

<sup>33</sup> « Curriculum emphasis » (p. 34, notre traduction).

<sup>34</sup> « Introduction into science » et « Learning from science » (Fensham, 1988b, p. 22, notre traduction).

<i>Curriculum emphasis</i> Roberts (1982) Dimensions du curriculum de sciences	« Solid Foundation » socle de connaissances	« Correct Explanations » la science source de savoirs	« Scientific Skill Development » la démarche scientifique	« Everyday Coping » applications à la vie quotidienne	« Structure of Science » fonctionnement de la science	« Self as Explainer » penser par soi-même	« Science, Technology, Decisions » science, technologie, société
Fensham (1988) Orientations de l'enseignement des sciences	« Induction into science » l'introduction aux sciences		Learning from science l'apprentissage par les sciences				
Martinand (2000) Missions de l'éducation scientifique et technique	familiariser les élèves aux modèles et aux langages spécifiques		familiariser les élèves avec les objets et les méthodes propres aux sciences et technologies	transmettre des outils qui permettent de penser la complexité et la diversité du monde		transmettre une forme de raisonnement qui permette de critiquer, décider, agir et débattre	
<i>Curriculum emphasis</i> van Berkel (2005) Dimensions du curriculum de sciences	« Normal Science Education » fondements théoriques			« History and Philosophy of Science » histoire et philosophie des sciences		« Science, Technology and Society » science, technologie, société	
<i>Two visions of Science Literacy</i> Roberts (2007) ; Roberts et Bybee (2014) Visions de l'éducation scientifique	vision I					vision II	

Tableau 2: comparaison des études sur les curricula de sciences

La mise en perspective proposée par notre tableau montre des similitudes entre les dimensions des curricula de sciences établies par Roberts (1982) et van Berkel (2005), les orientations proposées par Fensham (1988), les missions de l'éducation scientifique et technique identifiées par Martinand (2000) et les visions de l'éducation scientifique de Roberts (2007) ; Roberts et Bybee (2014). En outre, la comparaison de ces travaux met en évidence trois principales intentions pour l'enseignement des sciences : la transmission de savoirs disciplinaires, la transmission de savoirs relatifs à l'épistémologie des sciences et la construction d'une culture scientifique et technique qui permet de penser les relations entre la science, la société et l'environnement. Chez Fensham (1988), Roberts (2007) et Roberts et Bybee (2014), les savoirs relatifs à l'épistémologie des sciences sont intégrés à l'enseignement des savoirs et modèles spécifiques, dans l'objectif de former la relève scientifique.

Des critiques sont adressées à ces approches par le savoir, en particulier au tournant des années deux mille, alors que les curricula de sciences subissent de profondes mutations. Ces mutations émergent de demandes politiques, guidées par de nouveaux enjeux sociétaux liés notamment aux rapports de l'être humain à l'environnement. Ainsi de nouvelles formes de curricula émergent, dont la structure orientée vers les « éducations à... », l'action ou la réflexion critique, bousculent les structures des curricula traditionnellement organisés selon les disciplines scolaires. Nous allons maintenant les présenter.

### 3.1.1.2 Curricula de sciences orientés vers l'action

Vis-à-vis des nouveaux enjeux confiés à l'enseignement scientifique, l'une des principales critiques des approches par le savoir pointe l'absence de causalité entre les connaissances des élèves et leur engagement dans l'action (Jensen, 2002). Jensen (2002) identifie alors quatre dimensions qui structurent l'éducation à l'environnement<sup>35</sup>, qui comprend les savoirs scientifiques (première dimension), sans s'y limiter. En effet, les trois autres dimensions proposées par cet auteur concernent l'étude de la complexité des problèmes environnementaux (deuxième dimension), la recherche de solutions concrètes

<sup>35</sup> « Environmental education » (p. 325, notre traduction).

individuelles et collectives (troisième dimension) et l'identification de perspectives (quatrième dimension). Pour Jensen (2002), l'éducation à l'environnement ne permet l'action ou le changement des comportements que si les savoirs scientifiques sont mis en perspective avec les autres savoirs disciplinaires sur la question, et orientés vers la remise en cause de nos modes de vie, individuels et sociétaux, pour envisager un avenir meilleur.

L'approche d'un curriculum de sciences orienté par l'action est également adoptée par Hodson (2003). Dans son étude du contexte nord-américain, cet auteur identifie quatre enjeux dans les curricula de sciences et technologie (ST) : apprendre les ST ; apprendre à propos des ST ; faire des ST ; sensibiliser à l'engagement sociopolitique. La description de ces enjeux fait apparaître la relation science-technologie-société. Par exemple, « apprendre à propos des ST » comprend selon Hodson (2003), à la fois l'apprentissage des méthodes et des démarches ST, mais aussi leur mise en œuvre pour comprendre les relations science-technologie-société-environnement. De plus, Hodson (2003) définit l'engagement des élèves dans des actions concrètes comme un enjeu. Cette dimension sociopolitique est une particularité des travaux de cet auteur. Ce point de vue est consolidé dans Hodson et al. (2014), article qui pointe le manque d'actions concrètes des curricula de sciences « traditionnels » tiraillés entre enjeux d'enseignement scientifiques et enjeux de formation citoyenne (Roberts, 1982). Pour y remédier, Hodson et al. (2014) proposent un enseignement des sciences par l'activisme. Dans cette lignée, Liu (2013) et Yore (2012) (cités par Sjöström & Eilks, 2018) proposent une vision III de l'éducation scientifique davantage orientée vers l'action et l'engagement que les visions I et II proposées par Roberts (2007).

En outre, Sjöström et al. (2017) rapprochent les enjeux d'un curriculum de sciences orienté vers l'action et la pensée critique du concept allemand de *Bildung*. S'il est difficile de proposer une traduction littérale du mot, nous pouvons décrire le concept de *Bildung* comme structuré par des dimensions politiques et éducationnelles. Selon Vázquez-Levy (2002, cité par Sjöström et al., 2017), il concerne le long processus de formation de la pensée critique, au service de la connaissance de soi et de la recherche de vérité à travers des réflexions morales et éthiques. Ce processus aboutit à la formation de citoyens et de citoyennes autonomes. Nous retrouvons dans certaines études le concept de *Bildung* pour caractériser les curricula de sciences (Fensham, 2000 ; Bolte, 2008 ; Witz & Lee, 2009, cités par Sjöström et al., 2017). Sjöström et Eilks (2018) proposent de compléter les deux visions de l'éducation scientifique décrites par Roberts (2007) par une vision III inspirée du concept de *Bildung*. Celle-ci viserait à transformer les sujets et à changer la société durablement à travers un enseignement des sciences politisé.

Dans le contexte francophone, l'émergence dans les curricula d'objets tels que les « éducations à... » (EA) intéresse le champ des recherches en didactiques des sciences. En parallèle se développent des champs de recherches nouveaux pour les didactiques (Lange & Barthes, 2021). Par exemple l'introduction des questions socialement vives (QSV) en classe de sciences (Legardez & Simonneaux, 2006) ou autres controverses (Albe, 2005). Ces champs de recherche se développent également dans le monde anglophone, notamment dans les travaux de Ratcliffe (1997) ; Zeidler (2014) ; Zeidler et Sadler (2008) sur les « socio-scientific issues ».

Martinand (2014) se positionne quant à lui pour la mutation de didactiques de disciplines centrées sur des processus d'enseignement-apprentissages spécifiques, vers « des didactiques du curriculum ». Plus récemment, des recherches en didactiques des sciences et technologies s'intéressent aux prescriptions

du Socle commun de connaissances, de compétences et de culture (MEN, 2015) et des conséquences pour le curriculum de sciences qu'il pourrait impliquer (Lebeaume, 2019, 2021).

De notre point de vue, l'ensemble de ces approches transcende les limites disciplinaires pour se positionner à l'interface du rapport science-société et amener les élèves de la prise de conscience à l'action. À ce propos, Lange et Barthes (2021) décrivent une démarche réflexive partagée par les EA et les QSV qui vise l'autonomie critique pour les EA et l'argumentation pour les QSV. Concernant le potentiel d'action, Hodson et al. (2014) identifient deux dimensions d'un curriculum tourné vers l'activisme : apprendre comment être acteur ou actrice et expérimenter cette action. En ce sens, elles se rapprochent de l'éducation à l'environnement proposée par Jensen (2002), cité précédemment.

Vis-à-vis des modèles de transformation de la matière dont dispose la chimie, nous faisons l'hypothèse que son enseignement peut contribuer de façon particulière à l'enseignement des problèmes environnementaux, arguments que nous avons présentés dans le chapitre précédent (cf. 2.3.3).

À présent, terminons cette contextualisation par la présentation d'un ensemble de travaux qui s'intéressent spécifiquement aux curricula de chimie.

### 3.1.2 Curricula de chimie

#### 3.1.2.1 Revue de littérature internationale

Van Driel et al. (2005) spécifient les catégories établies par van Berkel (2005) en les adaptant au curriculum de chimie aux Pays-Bas. En s'appuyant sur l'ensemble de ces travaux, Eilks et al. (2013) définissent six « orientations » du curriculum de chimie allemand. Le tableau ci-dessous, construit à l'aide de la synthèse de littérature réalisée par Markic et al. (2010) présente et met en perspective les travaux que nous venons de citer (Tableau 3).

Curriculum emphasis in chemistry van Driel et al. (2005) Dimensions du curriculum de chimie	« Fundamental Chemistry » fondements théoriques de la chimie		« Chemistry, Technology, Society » chimie, technologie et société			« Knowledge Development in Chemistry » épistémologie de la chimie
General orientations of the chemistry curriculum Eilks et al. (2013) Orientations du curriculum de chimie	« Structure of the discipline » structure de la discipline académique	« Everyday life » vie quotidienne	« Technology and industry » questions industrielles et techniques	« Environmental » questions environnementales	« SSI » QSSV	« History of chemistry » structure selon histoire de la chimie

Tableau 3: comparaison des études anglophones et francophones sur les curricula de chimie

Nous l'avons organisé selon les mêmes modalités de construction que pour le tableau 1 : présentation des travaux en ligne selon un ordre chronologique et comparaison des dimensions/orientations grâce au découpage des colonnes.

Nous retrouvons dans ces travaux sur les curricula de chimie les trois principales intentions décrites plus haut d'après les travaux de Roberts (1982) ; Fensham (1988) ; Martinand (2000) ; van Berkel (2005) ; Roberts (2007) ; Roberts et Bybee (2014) sur les curricula de sciences : transmission de savoirs disciplinaires, transmission de savoirs relatifs à l'épistémologie des sciences et construction d'une culture scientifique et technique (CST).

Intéressons-nous maintenant aux travaux qui préconisent des approches spécifiques pour intégrer les problèmes environnementaux à l'enseignement de la chimie.

### 3.1.2.2 *Intégrer les problèmes environnementaux aux curricula de chimie : les propositions de la recherche*

Adams (1999) étudie une approche privilégiée pour intégrer la formation citoyenne à l'enseignement de la chimie : l'entrée par un problème environnemental afin de contextualiser les savoirs scientifiques<sup>36</sup>. Dans le contexte de l'enseignement supérieur de la chimie aux États-Unis, cette étude s'intéresse en particulier aux réactions chimiques impliquées dans le traitement des déchets.

En Allemagne, les travaux de Burmeister et al. (2012) identifient quatre approches possibles pour intégrer les problèmes environnementaux à l'enseignement de la chimie :

- appliquer les principes de la chimie verte<sup>37</sup> aux travaux pratiques ;
- contextualiser les savoirs de chimie avec des principes de développement durable ;
- utiliser des QSV ou controverses scientifiques ;
- intégrer l'enseignement de la chimie à des projets d'éducation au développement durable (EDD) menés par les établissements scolaires.

Un numéro dédié de la revue *Chemistry Education Research and Practice*, coordonné par certains de ces auteurs (Eilks & Rauch, 2012) donne des exemples pour chacune de ces approches dans différents contextes institutionnels (Allemagne, Australie, Brésil, Canada, Espagne et États-Unis) et à différents niveaux d'enseignement (du secondaire au supérieur).

À propos de l'enseignement des principes de la chimie verte, Burmeister et al. (2012) décrivent quatre insertions possibles dans l'enseignement de la chimie, allant de l'application expérimentale de ces principes (modèle 1) à leur mobilisation pour l'étude de problèmes complexes relatifs à l'environnement (modèle 4). Certaines études (Andraos & Dicks, 2012; Winterton, 2016) se focalisent sur l'adaptation de l'enseignement de la chimie à ces nouvelles pratiques expérimentales, selon le modèle 1. En cela, elles contribuent à la transmission de savoirs (pratiques) disciplinaires. C'est pourquoi nous ne les développons pas dans ce travail, où la focale est plutôt portée sur la possible construction d'une CST en classe de chimie. Comme exemple de modèle 4, Koulougliotis et al. (2021) proposent un enseignement des principes de la chimie verte permettant de questionner la relation science-société-environnement. Pour cela, il et elles préconisent l'entrée par des QSV : le changement climatique et le recyclage<sup>38</sup>.

Eilks et al. (2013) identifient également l'entrée par une QSV comme l'approche privilégiée pour favoriser la dimension « chimie, technologie, société » du curriculum. À l'instar de Adams (1999), ils considèrent qu'il s'agit d'une forme spécifique de « context-based science education », promue depuis les années quatre-vingt en Amérique du Nord et au Royaume-Uni.

Dans le prolongement des approches « context-based science education », Mahaffy (2017) suggère d'intégrer la question du changement climatique à l'enseignement de chimie du supérieur. Il propose ainsi une « contextualisation riche »<sup>39</sup> des savoirs de chimie, c'est-à-dire une mise en contexte qui permet de maîtriser les savoirs spécifiques tout en leur donnant du sens. Cette proposition consiste en une

---

<sup>36</sup> « The issues-directed or in-context approach » (Adams, 1999, p. 1088).

<sup>37</sup> Pour un rappel des 12 principes de la chimie verte, voir Anastas et Warner (1998).

<sup>38</sup> Nous reviendrons dans le chapitre 4 (section 4.1.3) sur la vivacité de telles questions.

<sup>39</sup> « Teaching from a rich context » (Mahaffy, 2017, p. 1028, notre traduction).

ressource numérique, nommée « Visualizing the Chemistry of Climate Change (VC3) » qui reprend plusieurs thèmes de l'enseignement de la chimie du supérieur liés au changement climatique : les isotopes, les gaz, les acides et les bases, la thermochimie.

Aux États-Unis, des études (Mohan et al., 2009; Zangori et al., 2017) tentent de connecter EDD et savoirs de chimie à travers une approche complexe. Pour cela, elles proposent d'aborder le réchauffement climatique en partant du cycle du carbone et d'explicitement mobiliser la transformation chimique pour interpréter les phénomènes mis à l'étude dans le cycle.

Enfin, la revue de littérature de Aubretch (2018) sur les ressources permettant l'intégration du changement climatique aux cours de chimie dans le supérieur pointe notamment les travaux de Mahaffy (2017), que nous avons déjà cités. Mais aussi Fahlman et al. (2018) dont le manuel propose de contextualiser les savoirs de chimie par des questions quotidiennes, liées à l'environnement ou à la santé. Flener-Lovitt (2014) quant à elle, rapporte un cours de chimie pour étudiants et étudiantes non-spécialistes qui aborde la question du changement climatique en étudiant les arguments climatosceptiques.

Cette brève revue de littérature met en évidence la diversité des méthodes envisageables pour aménager l'étude des problèmes environnementaux et l'enseignement de la chimie. Certaines reprennent la perspective des EA (Burmeister et al., 2012) ou des QSV (Burmeister et al., 2012; Eilks et al., 2013; Flener-Lovitt, 2014; Koulougliotis et al., 2021). D'autres ont une entrée par les savoirs, dans la lignée de la première dimension de l'éducation à l'environnement de Jensen (2002) et considèrent le changement climatique comme une façon de contextualiser les savoirs spécifiques (Fahlman et al., 2018; Mahaffy, 2017). Enfin les travaux de Mohan et al. (2009); Zangori et al. (2017) se démarquent par une entrée disciplinaire de la complexité. Aussi, nous trouvons peu — voire pas — de travaux francophones à propos de la possible insertion des problèmes environnementaux dans l'enseignement de la chimie au secondaire. C'est pourquoi notre travail se positionne dans cette niche d'étude, en commençant pas celle des curricula de chimie de deux contextes francophones : la Suisse romande et la France.

### *3.1.2.3 Les curricula de chimie dans deux contextes francophones : la France et la Suisse romande* *Organisation des curricula en Suisse romande et en France*

Dans les cantons de Suisse romande, le Plan d'études romand (PER) propose d'organiser l'enseignement des sciences dans la partie « Sciences de la nature » du domaine « Mathématiques et Sciences de la nature (MSN) » (CIIP, 2010) (Figure 21).

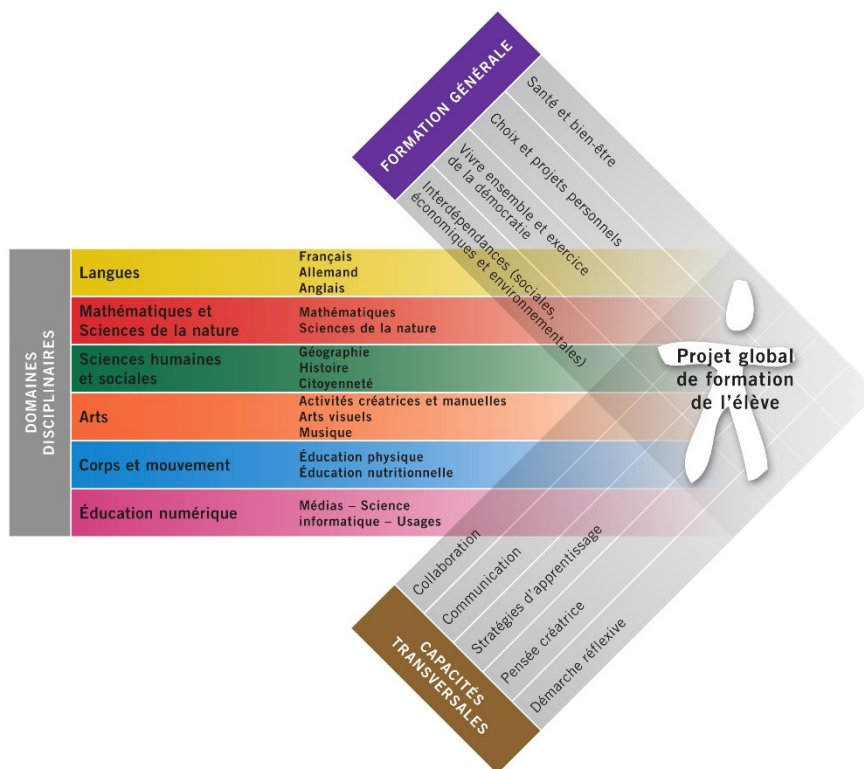


Figure 21 : organisation du PER en domaines disciplinaires, d'après CIIP (2010b)

Les Sciences de la nature s'organisent selon trois thématiques : « Phénomènes naturels et techniques », « Corps humain », « Diversité du vivant », auxquelles s'ajoute la thématique « Modélisation », partagée avec la partie « Mathématique ». En comparaison avec les disciplines académiques, la thématique « Phénomènes naturels et techniques » rassemble des contenus de l'ordre de la physique et de la chimie, et elle est souvent confiée à une physicienne ou un physicien de formation — au moins dans le canton de Genève. Les thématiques « Corps humain » et « Diversité du vivant », à la charge d'un ou d'une même enseignante, relèvent plutôt de la biologie (Figure 22).

<i>Modélisation</i>	<i>Phénomènes naturels et techniques</i>	<i>Corps humain</i>	<i>Diversité du vivant</i>	
<b>MSN 15</b> Représenter des phénomènes naturels, techniques ou des situations mathématiques <b>Mathématiques / Sciences de la nature</b>	<b>MSN 16</b> Explorer des phénomènes naturels et des technologies... <b>Sciences de la nature</b>	<b>MSN 17</b> Construire son schéma corporel pour tenir compte de ses besoins... <b>Sciences de la nature</b>	<b>MSN 18</b> Explorer l'unité et la diversité du vivant... <b>Sciences de la nature</b>	<b>Premier cycle</b>
<b>MSN 25</b> Représenter des phénomènes naturels, techniques, sociaux ou des situations mathématiques <b>Mathématiques / Sciences de la nature</b>	<b>MSN 26</b> Explorer des phénomènes naturels et des technologies à l'aide de démarches caractéristiques des sciences expérimentales... <b>Sciences de la nature</b>	<b>MSN 27</b> Identifier les différentes parties de son corps, en décrire le fonctionnement et en tirer des conséquences pour sa santé... <b>Sciences de la nature</b>	<b>MSN 28</b> Déterminer des caractéristiques du monde vivant et de divers milieux et en tirer des conséquences pour la pérennité de la vie... <b>Sciences de la nature</b>	<b>Deuxième cycle</b>
<b>MSN 35</b> Modéliser des phénomènes naturels, techniques, sociaux ou des situations mathématiques <b>Mathématiques / Sciences de la nature</b>	<b>MSN 36</b> Analyser des phénomènes naturels et des technologies à l'aide de démarches caractéristiques des sciences expérimentales... <b>Sciences de la nature</b>	<b>MSN 37</b> Analyser les mécanismes des fonctions du corps humain et en tirer des conséquences pour sa santé... <b>Sciences de la nature</b>	<b>MSN 38</b> Analyser l'organisation du vivant et en tirer des conséquences pour la pérennité de la vie... <b>Sciences de la nature</b>	<b>Troisième cycle</b>

Figure 22 : organisation de la partie « Sciences de la nature » du domaine MSN du PER en thématiques, d'après CIIP (2010b)

En France, les programmes scolaires suivent un découpage disciplinaire, complété par le « Socle commun de connaissances, de compétences et de culture » (Figure 23).

### Volet 3 : Les enseignements (cycle 4)

Français  
Langues vivantes (étrangères ou régionales)  
Arts plastiques  
Éducation musicale  
Histoire des arts  
Éducation physique et sportive  
Enseignement moral et civique  
Histoire et géographie  
Physique-Chimie  
Sciences de la vie et de la Terre  
Technologie  
Mathématiques  
Éducation aux médias et à l'information

Figure 23 : organisation des disciplines scolaires au cycle 4 (MEN, 2020, p. 1)

Ainsi dans le secondaire, l'enseignement de la chimie, associé à celui de la physique, est à la charge d'un ou une même enseignante, de même que la biologie et la géologie sont enseignées ensemble au sein de la discipline « Sciences de la vie et de la Terre » (SVT). Les programmes des disciplines se déploient en différents thèmes, au sein desquels les savoirs sont organisés et programmés en fonction des années du cycle (cf. annexe 2 pour une comparaison de l'organisation des deux systèmes scolaires).

L'organisation de l'enseignement des sciences selon des thématiques comme le propose le PER paraît d'emblée favorable à la construction d'une CST. En effet, l'entrée dans les savoirs de physique ou de chimie par une thématique telle que « Phénomènes naturels et techniques » peut donner l'occasion aux élèves d'étudier des phénomènes rencontrés dans la vie quotidienne et qui soulèvent des questions complexes (les conséquences des activités humaines sur l'environnement par exemple). Pour Marty et Ligozat (2019), ce découpage en thématiques répond à une intention de continuité des apprentissages sur l'ensemble de la scolarité de l'élève. Cependant, elles relèvent un « resserrement » des thématiques vers les disciplines académiques au cycle 3 (biologie, physique et, dans une moindre mesure, chimie), alors que les contenus des premiers cycles font appel à plusieurs disciplines. En revanche, du côté des programmes français, ce découpage disciplinaire est explicite aux cycles 3 (9-12 ans) et 4 (12-15 ans). Toutefois, nous relevons la délimitation de disciplines strictement scolaires qui associent des savoirs de disciplines académiques distinctes : « physique-chimie », « Sciences de la vie et de la Terre », « histoire-géographie » et sont confiées à des sujets enseignants spécialistes de formation (de la physique ou de la chimie, de la biologie ou de la géologie, de l'histoire ou de la géographie).

Dans le contexte suisse-romand, l'enseignement de la chimie est minoritaire vis-à-vis des autres disciplines scientifiques scolaires au début du secondaire — en termes de contenus et donc de temps consacré. Dans ce contexte, mais également en France, cet enseignement consiste notamment en l'introduction de la transformation chimique et son interprétation par le modèle de la réaction chimique (cf. 2.2). C'est pourquoi notre étude curriculaire s'intéresse spécifiquement à cet objet de savoir.

#### 3.1.2.3.2 *Étude des curricula à propos de la transformation chimique*

Considérant le curriculum comme l'ensemble des « objets à enseigner » et des « objets d'enseignement » et plaçant la focale sur le processus de transposition didactique (Chevallard, 1985, p. 39), nous mettons à l'étude deux types de données : les textes officiels et les ressources formelles — au sens de l'UNESCO (2011) — des deux contextes institutionnels. En effet, comme nous le présentions en introduction (cf. Chapitre 1), le travail de transposition didactique réalisé par l'enseignante ou l'enseignant est le plus souvent précédé d'une première transposition externe, réalisée par la noosphère dans la conception des programmes et des manuels d'enseignement.

Dans un premier temps, notre étude de la transposition didactique externe concerne donc : le domaine « Mathématiques et sciences de la nature » dans le PER pour la Suisse romande (CIIP, 2010d), et les programmes de physique-chimie du collège promus au Bulletin officiel (BO) pour la France (MEN, 2020). Nous utilisons les trois intentions pour l'enseignement des sciences dégagées par notre revue de littérature (cf. 3.1) comme grille de lecture, à savoir : la transmission de savoirs disciplinaires, la transmission de savoirs relatifs à l'épistémologie de la discipline et la construction d'une CST qui permet de penser la relation science-société-environnement. Plus précisément, nous cherchons à identifier : dans quelle(s) discipline(s) scolaire(s) retrouve-t-on des traces du concept de transformation chimique ? Quels enjeux d'apprentissage lui sont associés ? En particulier, est-ce qu'il existe des liens avec les problèmes environnementaux ?

Une première lecture des PER/programmes nous permet d'identifier que l'enseignement du concept de transformation chimique est prescrit au début du secondaire dans les contextes suisse-romand (cycle 3, élèves de 12-15 ans) et français (cycle 4, élèves de 11-15 ans).

Guidées par les questions ci-dessus, nous avons analysé systématiquement le PER du cycle 3 de la thématique « Phénomènes naturels et techniques » du domaine « Sciences de la Nature » et les programmes de physique-chimie de cycle 4. L'objectif est de repérer dans les textes officiels les enjeux associés à ce concept et d'en déduire l'intention pour l'enseignement scientifique qui apparaît. Cette recherche nous a conduites à nous intéresser aux deux autres thématiques du domaine « Sciences de la Nature » du PER, ainsi qu'à la thématique « Relations Homme-espace » dans le PER de géographie pour le contexte suisse-romand, mais aussi aux programmes de SVT français. En ce qui concerne ces textes officiels, nous avons cherché la présence des concepts « transformation chimique » et « réaction chimique ». Nous avons aussi cherché les extraits dans lesquels les PER/programmes faisaient référence au principe de conservation de la matière, concept associé à l'enseignement de la transformation chimique.

Dans un second temps, le choix des ressources formelles que nous avons consultées est guidé par les résultats de l'analyse des prescriptions officielles. Les textes officiels suisse-romands et français préconisent la mise en relation de la transformation chimique avec les questions de climat et d'environnement, prises en charge par les disciplines « biologie » et « géographie » en Suisse romande, SVT en France.

Le corpus étudié pour le cas suisse-romand comprend donc les Moyens d'enseignement romands (MER) (CIIP, 2010c, CIIP, 2010f) proposés en accompagnement du PER MSN 36 (physique-chimie), MSN 38 (biologie) et SHS 31 (géographie). Les MER sont des ressources très présentes dans les pratiques d'enseignement au secondaire I. Ils se composent d'un ensemble de documents à l'intention du corps enseignant, mais aussi à destination des élèves, qui facilitent la mise en œuvre des séquences selon les recommandations du PER.

Pour le contexte français, nous avons consulté un panel de manuels de cycle 4 des disciplines physique-chimie, SVT et histoire-géographie. Dans une recherche d'exhaustivité, nous avons consulté un manuel de chaque principale maison d'édition (Azan, 2017; Bordi, 2017; Couteleau, 2017; Daujean, 2017; Desormes, 2017; Donadéi & Lévêque, 2017; Duco, 2017; Dulaurans, 2017; Franchot & Fray, 2017; Gardarein, 2017; Jubault-Bregler & Guillaume, 2017; Meneret Noisette, 2017; Pothet & Rebulard, 2017; Ruffenach, 2017; Salviat & Girault, 2017).

Pour chaque ressource, nous avons cherché à répondre aux questions suivantes :

- Quelles ressources d'enseignement sont disponibles pour soutenir l'enseignement de la transformation chimique, notamment dans une perspective de traitement de questions complexes ?
- À quels moments intervient le concept de transformation chimique ? Pour soutenir quels(s) apprentissage(s) ?
- Quelle vision de l'éducation scientifique est alors mise en avant ?

Guidés par ces questions, nous avons cherché dans un premier temps toutes les activités, résumés de cours et exercices faisant explicitement mention de « la transformation chimique », de la « réaction chimique » ou du « principe de conservation de la matière ». Nous nous sommes intéressées d'une part

à ces expressions, mais aussi au langage symbolique propre à la chimie, à savoir l'équation de réaction chimique et le modèle moléculaire. En ce qui concerne le principe de conservation de la matière, nous avons également considéré les situations où la conservation des atomes ou de la masse sont évoquées. Une fois ces activités, résumés de cours ou exercices identifiés, nous avons décrit l'enjeu d'apprentissage qui lui était associé et nous en avons ainsi déduit l'intention pour l'enseignement des sciences associée. Ces données ont été consignées de façon systématique dans un tableau, organisées par chapitre thématique (cf. annexes 7 et 9 pour la Suisse romande ; annexes 8, 10 et 11 pour la France), dont la lecture nous permet de faire les constats exposés dans la partie qui suit.

#### *3.1.2.3.3 Résultats de l'étude curriculaire : entre découpage disciplinaire et injonction d'interdisciplinarité*

Nous avons décrit les prescriptions relatives à la transformation chimique en France et en Suisse romande dans le chapitre précédent (cf. 2.3). Dans les deux institutions scolaires étudiées, le concept de transformation chimique apparaît comme particulièrement important pour l'apprentissage des fondements épistémologiques de la discipline. Il permet en effet la mise en relation des niveaux de modélisation macroscopique et microscopique (cf. 2.2). Sous cet angle, il apparaît que les textes prescriptifs de ces deux contextes promeuvent un enseignement de la chimie orienté vers la transmission de savoirs disciplinaires et de savoirs relatifs à l'épistémologie.

Au-delà de ces injonctions centrées sur les savoirs de la chimie, le PER préconise l'interdisciplinarité. En effet, le MSN 36 demande explicitement que : « l'ensemble des thèmes traités permette d'établir des liens avec d'autres domaines ou disciplines, notamment, la dynamique du climat » (CIIP, 2010b, p. 39) et propose de faire des liens entre le chapitre à propos de la Matière (relatif à des savoirs de chimie), les thématiques « Diversité du vivant » du MSN 38 (biologie) et « Relation Homme-espace » du SHS 31 (géographie). En effet, dans le contexte suisse-romand, certains savoirs qui se rattachent à la discipline académique « géologie » sont à la charge de l'enseignant ou de l'enseignante de géographie.

De même, le programme français de cycle 4 indique que :

Les transformations chimiques peuvent servir de support pour introduire ou exploiter la notion de transformation chimique dans des contextes variés (vie quotidienne, vivant, industrie, santé, environnement). Elles permettent d'aborder des sujets liés à la sécurité, à notre impact sur le climat et l'environnement (émission de gaz à effet de serre) (...) C'est l'occasion de sensibiliser ainsi les élèves à la notion d'empreinte (ou bilan) carbone. (MEN, 2020, p. 99)

Nous pouvons y voir des liens avec les savoirs relatifs à l'environnement, au programme de SVT du même cycle (MEN, 2020, p. 108). De plus, ces questions environnementales sont explicitement visées par l'introduction du programme de physique-chimie selon laquelle, en fin de cycle 4, l'élève doit être capable « d'expliquer les impacts engendrés par le rythme et la diversité des actions de l'être humain sur la nature » et « d'approfondir la connaissance des notions indispensables à une bonne compréhension de l'origine du changement climatique et ses conséquences » (MEN, 2020, p. 95).

Avec la mise en relation des disciplines scolaires, les PER/programmes demandent d'enseigner la transformation chimique de sorte qu'elle permette de penser des situations complexes, en lien notamment avec le rôle des activités humaines dans le réchauffement climatique. Nous voyons dans ces prescriptions l'intention de construire une CST qui permet de penser les relations science-société-environnement. Cependant, les résultats de l'étude des ressources formelles vont plutôt dans le sens d'un enseignement disciplinaire de la chimie.

En effet, les MER associés au MSN 36 sont conçus pour permettre aux élèves d'interpréter la transformation chimique comme une réaction chimique. Ainsi, les exercices proposés demandent de modéliser les phénomènes observés grâce à des concepts spécifiques (molécule, atome, réactifs, produits, équation de réaction chimique). Nous ne relevons aucune activité/exercice qui permettrait à l'élève de mobiliser ce concept pour l'étude d'une situation complexe.


Mêmes constats pour tous les manuels de physique-chimie français consultés. Si certains exercices mentionnent des expériences de la vie quotidienne (combustion du méthane ou du charbon pour cuisiner) ou des phénomènes étudiés en classe de SVT (photosynthèse et respirations), ces expériences servent en réalité d'éléments de contextualisation. Par exemple, l'exercice présenté ci-dessous fait référence à l'équation de réaction de photosynthèse (Figure 24).

**12 Photosynthèse**

Le frère de Rachid a écrit l'équation de la photosynthèse, la transformation chimique à la base de la croissance des plantes, de la façon suivante :

$$6 \text{CO}_2 + 6 \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6 + 6 \text{O}_2$$

dioxyde de carbone    eau                    sucre                    dioxygène



1. Identifier les réactifs et les produits.
2. Cette équation est-elle équilibrée ?

Figure 24 : exercice issu du manuel de physique-chimie Ruffenach (2017, p. 105)

Cette transformation chimique pourrait permettre d'étudier la transformation du gaz dioxyde de carbone présent dans l'atmosphère, en gaz dioxygène, nécessaire à la vie sur Terre. Mis en relation avec un autre type de transformation chimique : la combustion, par exemple, l'étude de ce phénomène pourrait permettre d'aborder le problème de la déforestation en classe de chimie. Ce n'est pas le cas de l'exercice proposé par ce manuel. En effet, l'enjeu est ici strictement disciplinaire, avec une centration sur l'acquisition de concepts : savoir définir « réactif » et « produit » et mobiliser le principe de conservation en termes de redistribution des atomes. De façon générale, à l'exception de rares activités — relevées dans les manuels Daujean et al. (2017, p. 98) ; Meneret Noisette (2017, p. 70) ; Ruffenach (2017, p. 89) — les exercices des manuels consultés n'introduisent pas de situation suffisamment complexe pour donner l'occasion à l'élève de penser les rapports de l'être humain à l'environnement tels que les programmes l'envisagent.

En revanche, nous retrouvons l'étude de la relation complexe de l'être humain à l'environnement dans les ressources de biologie/géographie/SVT consultées. Sa représentation dans les MER mobilise le cycle du carbone. Le rôle des activités humaines dans le déséquilibre du cycle du carbone est mis en évidence par la production de gaz dioxyde de carbone : gaz identifié comme étant « à effet de serre ». Ainsi la mise en relation du concept de combustion (transformation chimique) et de celui de l'effet de serre doit permettre à l'élève de penser l'origine anthropique du réchauffement climatique. Cette situation

complexe, représentée par le cycle du carbone, est également retrouvée dans les MER de SHS 31 (CIIP, 2010c) pour l'étude des mêmes questions.

Mêmes constats pour l'ensemble des manuels de SVT français : le cycle du carbone est un objet incontournable des manuels pour amener les élèves à penser le rapport de l'être humain à son environnement. Dans l'exemple présenté ci-dessous (Figure 25), le rôle des activités humaines dans l'émission du dioxyde de carbone dans l'atmosphère est clairement mis en avant par la comparaison des deux cycles (sans activités humaines et avec activités humaines). Ces représentations du cycle du carbone font partie d'un ensemble de documents qui doivent être mis en relation pour répondre à un problème complexe : « le lien entre exploitation du pétrole et émissions de CO<sub>2</sub> ». Ces activités de type étude documentaire sont typiques de l'enseignement des SVT au secondaire en France.

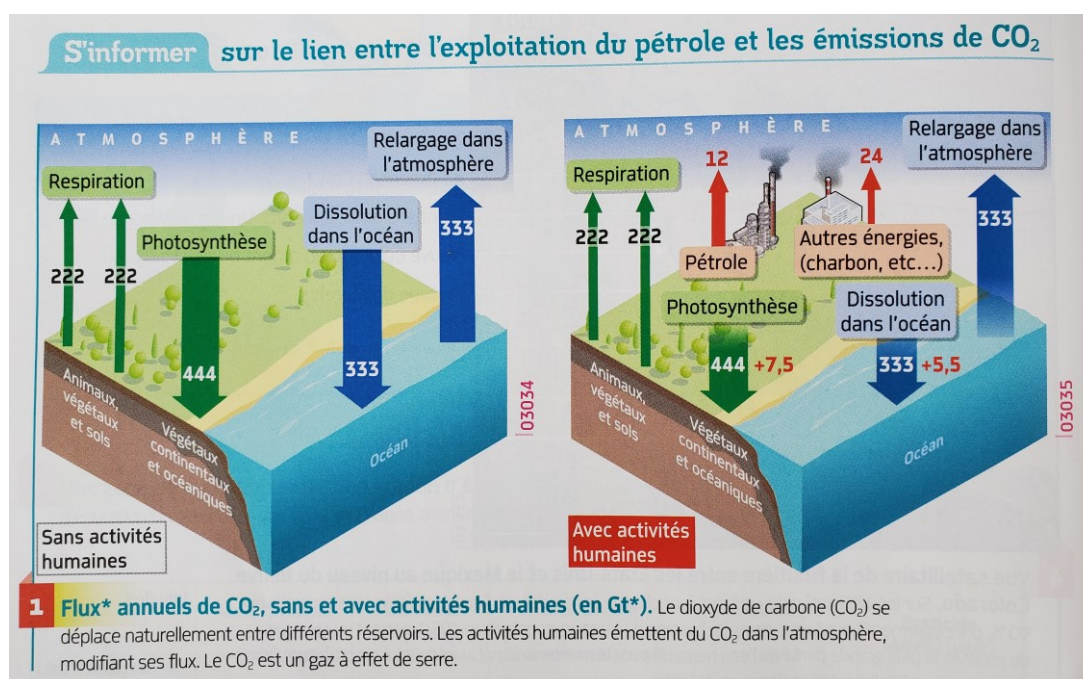


Figure 25 : activité d'étude documentaire du manuel Gardarein (2017, p. 72)

### 3.1.2.3.4 Conclusion de l'étude curriculaire

Les trois intentions pour l'enseignement des sciences semblent mises en tension par les curricula de chimie français et suisse-romand. En effet, si les contenus thématiques des PER/programmes en chimie semblent contribuer à un enseignement strictement disciplinaire de la chimie — centré sur ses savoirs et son épistémologie —, les intentions générales insistent sur le rôle des concepts de chimie pour la formation citoyenne, en particulier son rôle, en lien avec d'autres disciplines scolaires, pour la compréhension des problèmes environnementaux. Comprendre de tels problèmes demande d'investir les savoirs et l'épistémologie de la chimie dans une approche complexe des situations étudiées. Ainsi, la transformation chimique devrait logiquement être mobilisée dans des situations qui traitent des transformations de la matière d'origine anthropique et de leurs conséquences sur l'environnement. Or, notre étude des ressources montre que ces situations sont majoritairement confiées aux disciplines biologie/géographie/SVT. Si les prescriptions officielles insistent sur l'importance d'une approche interdisciplinaire, les PER/programmes de chimie donnent peu d'indications quant à leurs possibles mises en œuvre en classe. À l'instar de Martinand (2016), nous interrogeons l'enseignabilité des

problèmes environnementaux dans le cadre rigide des disciplines scolaires. En particulier leur potentiel « défaut de scientificité » (p. 27) dû à la prévalence des points de vue économique et politique dans leur formulation, qui rendraient difficile leur articulation aux contenus de sciences au début du secondaire.

Ces résultats interrogent également le rôle des textes officiels dans le processus de transposition didactique, en particulier à l'articulation transposition didactique externe/transposition didactique interne (Chevallard, 1991). À ce propos, Bruillard (2005) rappelle que les manuels scolaires sont non seulement des intermédiaires entre les textes officiels et les pratiques d'enseignement-apprentissage, mais qu'ils sont également eux-mêmes influencés par ces pratiques. Étudier cette partie « d'un système complexe » (p. 24), nous renseigne alors sur l'épistémologie et le discours de la discipline scolaire, données qui peuvent éclairer le fonctionnement effectif des pratiques dans les classes. En effet, les tensions mises en évidence dans cette étude nous conduisent à nous intéresser aux pratiques d'enseignement-apprentissage de la chimie en Suisse romande et en France.

### 3.2 Au niveau des pratiques

Nous allons à présent présenter les résultats d'études de pratiques d'enseignantes et d'enseignants de chimie à propos de l'intégration de questions complexes relatives à l'environnement dans leurs enseignements au secondaire. Les deux premières études, menées aux Pays-Bas et en Allemagne, sont issues de la littérature. La troisième étude est le fruit d'une enquête par questionnaire que nous avons réalisée en France.

#### 3.2.1 Études sur le positionnement des sujets enseignants vis-à-vis des intentions des curricula

L'étude de van Driel et al. (2005) qui interroge un tiers des enseignantes et enseignants hollandais de chimie montre qu'elles et ils identifient clairement les trois principales intentions pour l'enseignement des sciences. La dimension qui apparaît en premier dans les réponses au questionnaire est celle que nous avons traduite par « fondements théoriques de la chimie ». La deuxième dimension à apparaître dans les réponses des sujets interrogés est « chimie, technologie et société ». En effet, selon cette étude, les sujets enseignants hollandais mettent en avant le rôle des savoirs de la chimie dans la compréhension des problèmes de société et dans la prise de décisions.

L'étude de Markic et al. (2010) reprend le questionnaire construit par van Driel et al. (2005) pour mener la même étude auprès des sujets enseignants allemands. Leurs résultats montrent que, contrairement à leurs homologues hollandais, les enseignantes et les enseignants de chimie allemands du secondaire n'identifient pas la dimension « chimie, technologie et société » comme un enjeu principal du curriculum. Les réponses au questionnaire montrent que les sujets enseignants du début du secondaire lui préfèrent la dimension « Épistémologie de la chimie », quand celles et ceux qui enseignent en fin de secondaire insistent sur la dimension « fondements théoriques de la chimie ».

#### 3.2.2 Une étude des pratiques par entretiens en Allemagne

L'étude de Feierabend et al. (2011) interroge l'intégration du changement climatique dans l'enseignement de la chimie au secondaire chez vingt sujets enseignants allemands. Les résultats de leur enquête par entretiens semi-dirigés montrent que ces sujets citent en priorité la chimie comme discipline scolaire devant prendre en charge la question du changement climatique (viennent ensuite la biologie et la géographie). Si le lien entre changement climatique et curriculum de chimie n'est pas une évidence pour certains, la majorité des sujets interrogés identifient les thèmes suivants pour introduire le changement climatique au secondaire : les hydrocarbures, les combustions, la composition de l'air et les

gaz, les réactions d'oxydoréduction, le cycle du dioxyde de carbone, l'écologie. Concernant les raisons qui les conduisent à introduire le changement climatique au secondaire, Feierabend et al. (2011) invitent les enseignantes et enseignants à citer les objectifs d'un enseignement de la chimie intégrant le changement climatique. À cette question, une majorité (quatorze) répond que le changement climatique permet de transmettre des savoirs et modèles spécifiques à la chimie. Près d'un quart d'entre elles et eux (neuf) cherchent à sensibiliser les élèves en vue de changer leur comportement. Huit sujets cherchent à favoriser l'évaluation des élèves. Cinq visent le développement de l'esprit critique, quatre veulent donner du sens à la chimie en montrant sa pertinence pour comprendre le monde. Enfin, trois sujets enseignants utilisent le changement climatique pour développer les compétences de communication des élèves. Si nous cherchons à rapprocher ces réponses des trois principales intentions des curricula de chimie que nous dégagons de notre revue de littérature, nous retrouvons la transmission de savoirs disciplinaires et la construction d'une CST. Résultats concordants avec ceux obtenus par van Driel et al. (2005).

Deux des objectifs concernent des dimensions de l'enseignement plus transversales que spécifiques à la chimie selon nous : la question de l'évaluation et le développement de compétences communicationnelles. Enfin, Feierabend et al. (2011) identifient une discordance entre le discours des sujets sur l'importance du changement climatique dans l'enseignement de la chimie au secondaire et ce qu'ils disent de leurs pratiques. Si sept d'entre eux évoquent la mention régulière du changement climatique dans leurs différents chapitres de chimie et cinq suggèrent la mise en place d'une approche interdisciplinaire, une majorité du groupe interrogé cite les difficultés qui les contraignent à renoncer à intégrer cette question à leurs enseignements. En particulier, leur difficulté à trouver une approche cohérente pour introduire les savoirs de la chimie à travers le thème du changement climatique et le manque de temps lié à un curriculum surchargé. Ces arguments pourraient expliquer les résultats obtenus par l'étude de Markic et al. (2010) et nous invitent à nous intéresser au cas des sujets enseignants francophones.

Si nous prenons quelques précautions vis-à-vis de l'ancienneté de ces études, en regard de la vitesse d'évolution des curricula, notre récente étude des curricula français et suisse-romand identifie les mêmes obstacles à l'intégration des problèmes environnementaux à l'enseignement de la chimie : manque de cohérence et surcharge du curriculum (Sudriès et al., 2023). Ces constats nous amènent à nous interroger sur la mise en œuvre effective des recommandations officielles dans les pratiques d'enseignement.

### 3.2.3 Une étude des pratiques par questionnaire en France

Bien que notre thèse adopte une approche comparatiste des contextes français et suisse-romand, nous n'avons pu mener cette enquête par questionnaire qu'en France. En effet, interroger les sujets enseignants à propos de leurs pratiques dans le canton de Genève (Suisse romande) demande la mise en œuvre de démarches administratives spécifiques et chronophages. Ces contraintes ne nous ont pas permis de diffuser le questionnaire dans le canton de Genève dans le temps dévolu à notre projet de thèse.

#### 3.2.3.1 Méthodologie : une étude par questionnaire Conception du questionnaire et mode de passation

Le questionnaire (cf. annexe 12) est conçu numériquement sur la plateforme *LimeSurvey*<sup>40</sup>. Il comprend dix-sept questions fermées réparties en quatre parties. La première partie du questionnaire porte sur les sujets (six questions) : leur âge, leur genre, leur académie de formation, leur nombre d'années

---

<sup>40</sup> <https://www.limesurvey.org/fr>

d'enseignement, les niveaux auxquels ils enseignent, leur formation initiale. Ces variables, considérées comme « supplémentaires » au moment de l'analyse, sont nécessaires pour vérifier si certaines réponses aux questions dépendent de ces paramètres propres aux individus.

Les parties 2, 3 et 4 sont guidées par les questions suivantes :

Q1: comment les sujets enseignant la physique-chimie interprètent-ils les recommandations des programmes de cycle 4 relatives aux problèmes environnementaux ?

Q2: comment se positionnent-ils dans leurs pratiques d'enseignement vis-à-vis des recommandations des programmes de cycle 4 ?

Q3: que disent-ils des raisons qui les conduisent à intégrer ou non les problèmes environnementaux à leurs enseignements au collège ? En particulier en ce qui concerne les chapitres de chimie ?

La deuxième partie interroge le degré d'accord des sujets enseignants avec les enjeux de l'éducation au développement durable (EDD)<sup>41</sup> tels que définis par le MEN<sup>42</sup> (trois questions). Nous cherchons ainsi à répondre à notre Q1. Pour formuler ces questions, nous faisons donc explicitement référence à la définition institutionnelle de l'EDD (cf. Figure 26 pour un exemple de ces questions).

---

<sup>41</sup> Dans un souci de clarté dans la rédaction des questions que nous adressons aux sujets enseignants, nous avons choisi d'utiliser l'expression « EDD » au sens institutionnel du terme : « La compréhension des relations entre les questions environnementales, économiques, sociales et culturelles doit aider les élèves à mieux percevoir : l'interdépendance des sociétés humaines et du système Terre, la nécessité de faire des choix informés et responsables et d'adopter des comportements qui tiennent compte de ces équilibres, l'importance d'une solidarité à l'échelle mondiale » (MEN, 2022).

<sup>42</sup> Les items qui apparaissent dans le questionnaire reprennent *in extenso* les enjeux de l'EDD définis par le MEN et consultables sur son site internet au moment où nous avons conçu le questionnaire (printemps 2021). Comme nous l'indiquons dans une note de bas de page précédente, cette définition n'apparaît plus en ces termes au moment où nous rédigeons ce chapitre : <https://www.education.gouv.fr/les-objectifs-de-developpement-durable-4205> (consulté le 17 juillet 2023).

Selon vous, l'EDD permet aux élèves:

(Choisissez la réponse en fonction de votre degré d'accord: 1-tout à fait d'accord ; 2-d'accord ; 3-plutôt d'accord ; 4-plutôt pas d'accord ; 5-pas d'accord)

Choisissez la réponse appropriée pour chaque élément :

	1	2	3	4	5
de prendre conscience des risques (naturels ou liés à l'activité humaine)	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
d'analyser les causes et conséquences des risques pour l'environnement ou pour l'être humain	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
d'être sensibilisé.es aux problèmes de santé publique liés aux comportements ou à l'alimentation	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
d'explorer le monde des objets, leur production, leur design, leur cycle de vie, d'en identifier les usages dans la vie quotidienne	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
de comprendre et adopter un comportement responsable vis-à-vis de l'environnement et des ressources de la planète, de la santé, des usages des progrès techniques	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
d'être capable de différencier responsabilités individuelle et collective dans les domaines de l'environnement, de la santé, des usages des progrès techniques	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
d'entrer dans la pluridisciplinarité	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

Figure 26 : question 3 de la partie 2 du questionnaire

En effet, nous avons montré que la discipline scolaire « chimie » est à même de traiter les problèmes environnementaux (cf. Chapitre 2), mais qu'il existe une tension dans les prescriptions officielles entre injonction à aborder ces problèmes et absence d'indication quant à leur mise en œuvre effective en classe.

La troisième partie, également orientée par notre Q1, demande aux enseignants et enseignantes quelles disciplines scolaires et quels thèmes du programme de physique-chimie peuvent contribuer à l'EDD selon elles et eux (Figure 27). À l'instar de Martinand (2008), la définition institutionnelle de l'EDD promeut une dimension pluridisciplinaire et concerne donc l'ensemble des disciplines scolaires. De plus, pour le Thème 1 « Organisation et transformations de la matière » du programme de physique-chimie, qui concentre les savoirs de chimie au cycle 4, le programme ne fait pas de propositions explicites relatives à l'EDD, alors que nous en avons montré le potentiel.

Selon vous, quel(s) thème(s) du programme de physique-chimie peuvent contribuer à l'EDD ?

Veuillez choisir toutes les réponses qui conviennent :

- Thème 1: Organisation et transformations de la matière
- Thème 2: Mouvements et interactions
- Thème 3: L'énergie et ses conversions
- Thème 4: Des signaux pour observer et communiquer
- aucun

Figure 27 : question 2 de la partie 3 du questionnaire

Enfin, la dernière partie interroge l'intégration de l'EDD dans les pratiques d'enseignement (Figure 28), d'un point de vue général dans un premier temps, puis plus spécifiquement en ce qui concerne la chimie (six questions). Nous cherchons alors à répondre à nos Q2 et Q3. Les items de réponses ont été construits de façon empirique, sur la base d'entretiens d'explicitation réalisés avec un enseignant et une enseignante, faisant l'objet d'étude de cas dans une autre partie de notre travail (cf. Chapitre 9).

Quel est votre degré d'accord avec les affirmations suivantes:

(1-tout à fait d'accord ; 2-d'accord ; 3-plutôt d'accord ; 4-plutôt pas d'accord ; 5-pas d'accord)

Choisissez la réponse appropriée pour chaque élément :

	1	2	3	4	5
c'est le rôle de l'enseignement de la chimie d'intégrer l'EDD	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
les savoirs de la chimie permettent de comprendre les enjeux liés à l'EDD	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
l'EDD permet de contextualiser et donner du sens aux savoirs de la chimie	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
l'EDD intégrée à l'enseignement de la chimie intéresse et motive les élèves	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

Figure 28 : question 6 de la partie 4 du questionnaire

Le questionnaire est diffusé en ligne, au niveau national par l'Union des Professeurs de Physique-Chimie (UdPPC). Après cinq mois de diffusion, nous avons obtenu cent soixante-quatre réponses au questionnaire, dont cent treize réponses partielles (questionnaires non achevés) et cinquante et une réponses complètes sur lesquelles portent les analyses qui suivent.

### 3.2.3.1.2 Méthode d'analyse statistique

Nous avons mené une analyse factorielle des correspondances multiples (ACM) grâce au logiciel *Rstudio* (Allaire, 2021) et le package *FractoMineR* (Husson et al., 2008). Cette méthode permet d'étudier la variabilité des individus d'un point de vue multidimensionnel. Elle consiste à réduire le nombre de variables nécessaires pour décrire les données en produisant des facteurs — composés des modalités de variables pondérées les plus significatives — constituant des axes sur un plan dit factoriel, sur lequel sont projetés à la fois les modalités de réponses et les individus. Ainsi, chaque individu est étudié vis-à-vis de l'ensemble de ses réponses au questionnaire, appelé « profil de réponse » (Pagès, 2013, p. 40). L'association des modalités de variables et des individus est représentée graphiquement par la proximité des points dans l'espace. Nous obtenons ainsi des groupes que nous interprétons comme des « profils » d'enseignantes ou d'enseignants.

Pour construire ces profils, nous réalisons dans un deuxième temps une analyse en clusters (analyse par classification hiérarchique sur composantes principales, CHCP)<sup>43</sup> réalisée à partir de l'ACM. L'analyse en clusters à partir des facteurs établis par l'ACM permet de proposer des typologies de réponses.

<sup>43</sup> Plus souvent nommé « HCPC » pour « Hierarchical Clustering on Principal Components ».

Le nombre de clusters retenu à partir de la CHCP correspond au critère proposé par *FactoMineR*, à savoir la partition avec la plus grande perte d'inertie relative<sup>44</sup> :  $\frac{i \text{ cluster } n + 1}{i \text{ cluster } n}$

### 3.2.3.2 Résultats de l'étude par questionnaire

#### 3.2.3.2.1 Description de l'échantillon

La majorité des sujets (63 %) s'identifient au genre féminin, 33 % au genre masculin (4 % de non-réponses).

La tranche d'âges 36-40 ans est la plus représentée (22 %). Suivent les tranches 41-45 et 51-55 ans : 16 % de l'échantillon chacune. Viennent ensuite les tranches 46-50 ans et 20-25 ans (10 % chacune) (Figure 29).

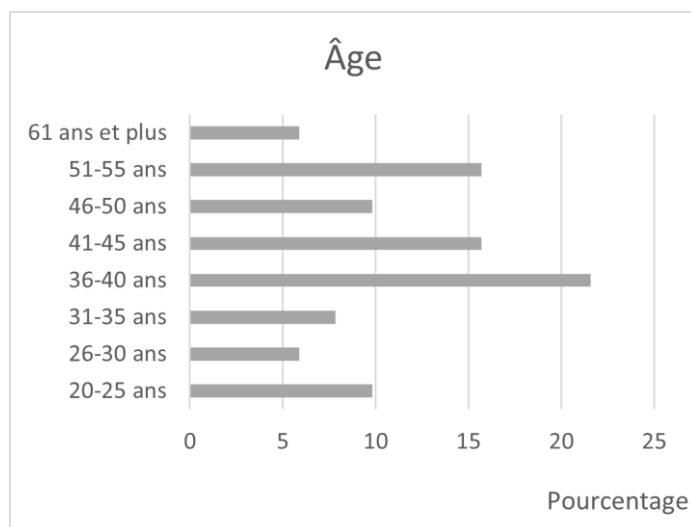


Figure 29 : répartition des individus selon leur âge

Une majorité (41 %) des sujets enseigne depuis plus de 20 ans, 20 % d'entre eux ont entre 11 et 15 ans d'ancienneté, 32 % entre 0 et 10 ans (Figure 30).

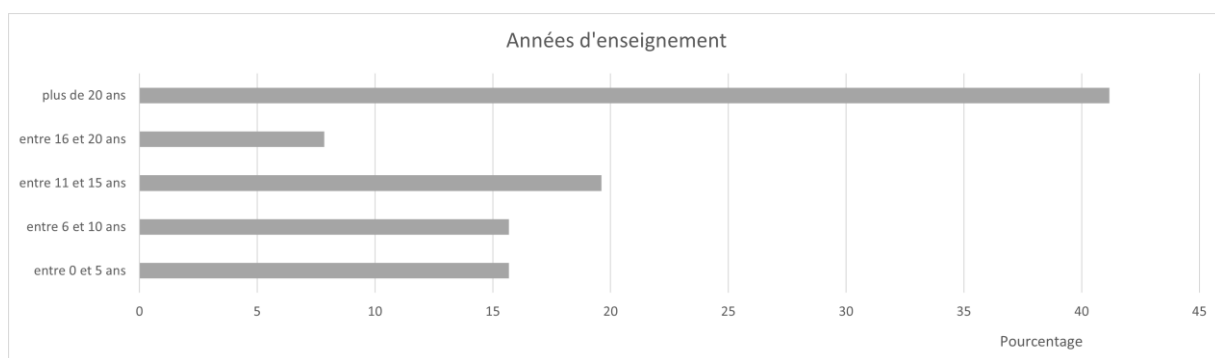


Figure 30 : répartition des individus selon leurs années d'enseignement

49 % des sujets ont une formation initiale bidisciplinaire (physique-chimie), 24 % sont plutôt formés en physique, 25 % plutôt en chimie (2 % d'autres formations).

<sup>44</sup> L'inertie correspond à une mesure de la variance. Ce critère est un critère traditionnellement utilisé pour choisir le nombre de clusters (cf. Pagès, 2013).

Leur formation a eu lieu en particulier dans les académies de Toulouse (14 %), Aix-Marseille, Grenoble et Lyon (8 % de réponses chacune). Viennent ensuite les académies de Lille, Normandie, Orléans-Tours et Paris (6 % de réponses chacune) (4 % d'autres lieux de formation).

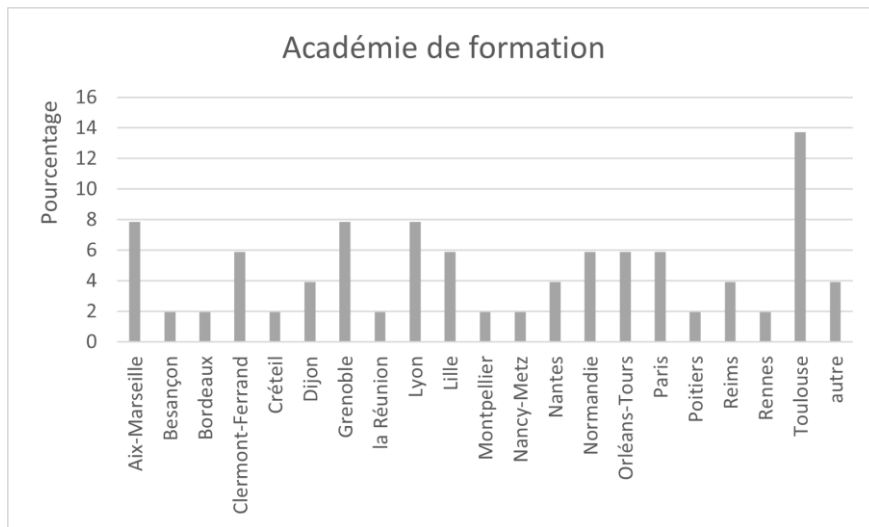


Figure 31: répartition des individus selon leur académie de formation

En généralisant, les sujets interrogés enseignent à tous les niveaux du cycle 4 : 61 % ont des classes de 5<sup>e</sup>, 73 % ont des classes de 4<sup>e</sup> et 71 % ont des classes de 3<sup>e</sup>.

### 3.2.3.2.2 Résultats des analyses

Les résultats de la CHCP (Figure 32) ne montrent pas une distribution des individus en des profils marqués, mais plutôt une répartition en trois clusters (cluster 1 : N=26 ; cluster 2 : N=22 ; cluster 3 : N=3).

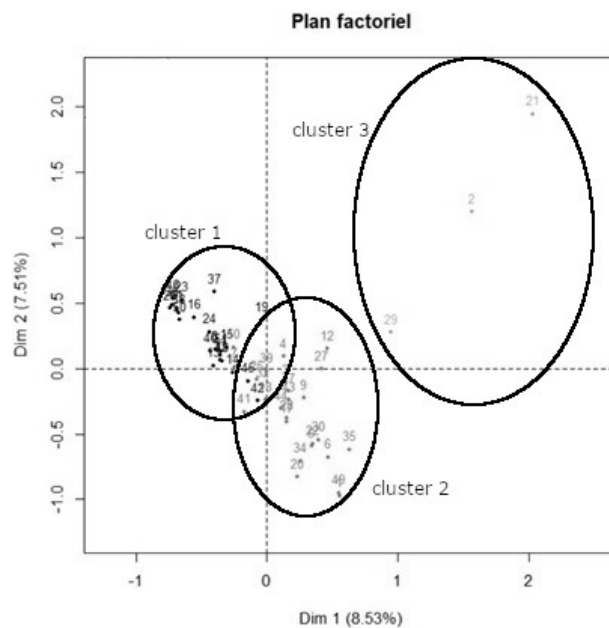


Figure 32 : résultat de la CHCP

Le profil 1 (cluster 1 sur le graphique) regroupe les individus en accord avec la définition institutionnelle de l'EDD et l'importance de son intégration dans les différentes disciplines scolaires. Ces individus se disent sensibles aux questions d'EDD et déclarent l'intégrer dans leurs enseignements au cycle 4, très souvent dans les thèmes 1 « Organisation et transformations de la matière », 3 « L'énergie et ses conversions » et 4 « Des signaux pour observer et communiquer », souvent dans le thème 2 « Mouvements et interactions », à travers des activités pédagogiques diverses (travaux pratiques, projets pluridisciplinaires, accueil d'intervenants ou intervenantes, activités informatiques). Pour ces sujets enseignants, les savoirs de physique-chimie sont nécessaires pour comprendre les enjeux liés à l'EDD, et elles et ils considèrent que c'est le rôle de l'enseignement de la chimie d'intégrer l'EDD. De plus, elles et ils indiquent que l'EDD donne du sens aux savoirs de chimie et motive les élèves. Les individus enseignant depuis plus de vingt ans et ceux formés dans l'académie de Grenoble sont surreprésentés dans ce profil.

Les individus du profil 2 (cluster 2 sur le graphique) ont des réponses plus nuancées. Ils déclarent l'EDD comme étant plutôt importante et l'intègrent rarement dans leurs enseignements au cycle 4 (souvent aux thèmes 1 et 3, rarement au thème 4). Ils sont plutôt en accord avec les éléments issus de la définition institutionnelle de l'EDD, mais n'identifient pas vraiment l'aspect pluridisciplinaire de son enseignement. Selon eux, l'EDD n'est pas un enjeu du programme de cycle 4. Ils déclarent cependant que les savoirs de physique-chimie sont nécessaires pour comprendre l'EDD et que c'est le rôle de la chimie d'enseigner ces questions. D'après leurs réponses, l'EDD peut donner du sens aux enseignements de physique-chimie, mais pas à celui de chimie en particulier. Les individus ayant plutôt une formation initiale en physique sont surreprésentés dans ce groupe.

Enfin, trois individus constituent le profil 3 (cluster 3 sur le graphique : individus 2, 21 et 29). Parmi les raisons qui justifieraient l'intégration de l'EDD à leur enseignement, ces individus ne se disent pas sensibles aux enjeux de l'EDD. Ils ne sont pas en accord avec certains éléments de la définition institutionnelle de l'EDD et ne semblent pas identifier le caractère pluridisciplinaire de son enseignement. Pour ces individus, ce n'est pas le rôle des disciplines scientifiques scolaires (physique-chimie et SVT) de traiter l'EDD. Ils déclarent pourtant intégrer parfois l'EDD dans leurs enseignements au cycle 4, dans le thème 2 (très souvent) et le thème 4 (souvent), chapitres qui concernent des savoirs de physique : mécanique et optique notamment. Pour ces individus, les savoirs de chimie ne sont pas nécessaires pour comprendre les enjeux de l'EDD, mais ils considèrent que l'EDD peut donner du sens aux enseignements de chimie. Selon eux, l'EDD est très importante. Comme pour le profil 2, les individus de ce profil ont majoritairement une formation initiale en physique.

Comme nous l'avons vu dans la présentation du questionnaire, plusieurs aspects concernant les pratiques enseignantes nous intéressent. Ainsi, nous réalisons une analyse consistant en la projection de groupes de variables dans le plan factoriel. Les groupes de variables sont définis selon les groupes de questions présentées au début de cette partie : les informations personnelles, la définition de l'EDD, les raisons qui motivent à intégrer l'EDD, les pratiques déclarées d'enseignement en physique-chimie, les pratiques déclarées qui concernent l'enseignement de la chimie. Les résultats de cette analyse nous montrent que les individus qui partagent la même définition de l'EDD sont proches dans le plan de ceux qui ont les mêmes raisons d'intégrer l'EDD à leur enseignement. Les modalités des variables concernées — les modalités qui s'expriment chez ses individus pour les variables « définition de l'EDD » et « raison

d'intégrer l'EDD» — constituent donc les traits caractéristiques des profils d'enseignantes et d'enseignants décrits dans les résultats de l'analyse en clusters (CHCP).

#### 3.2.3.2.3 Conclusion de l'étude par questionnaire

Dans le chapitre 2, nous avons montré à la fois le potentiel de la discipline scolaire « chimie » pour enseigner les problèmes environnementaux et le manque de moyens à disposition des sujets enseignants quant à leur mise en œuvre. Ces constats pourraient nous laisser penser que les enseignantes et enseignants de physique-chimie abordent peu les problèmes environnementaux dans leurs séquences de chimie, les réservant aux enseignements de physique, voire les excluant totalement. Les résultats de cette enquête par questionnaire vont plutôt à l'encontre de notre hypothèse. En effet, les caractéristiques du profil 1 montrent un certain nombre d'individus qui reconnaissent la dimension pluridisciplinaire de l'EDD et déclarent l'intégrer à leurs enseignements de chimie. Ces sujets qui considèrent que les savoirs de la chimie sont nécessaires pour comprendre l'EDD, que c'est le rôle de la chimie de traiter ces problèmes, montrent une intention d'enseigner la chimie pour construire une CST, enjeu fort des curricula de sciences actuels (cf. 3.1.1), tout en donnant du sens aux savoirs de chimie. En cela, elles et ils se rapprochent de leurs homologues hollandais, interrogés dans l'étude de van Driel et al. (2005) qui, nous le rappelons, favorisent un enseignement de la chimie orienté non seulement vers la transmission de savoirs disciplinaire, mais aussi vers une CST pour chaque élève. Les caractéristiques du profil 1 sont également proches des réponses obtenues dans les entretiens menés en Allemagne par Feierabend et al. (2011) : enseignement des savoirs et des modèles et sensibilisation des élèves au réchauffement climatique.

Les caractéristiques du profil 2 montrent des réponses plus nuancées. Si les sujets qui constituent ce profil donnent des réponses proches du profil 1 quant à la définition institutionnelle de l'EDD, ils n'identifient pas toujours le caractère pluridisciplinaire de son enseignement. En outre, les individus du profil 2 n'intègrent pas l'EDD à leurs pratiques, bien qu'ils considèrent que c'est le rôle de la chimie d'aborder ces questions et que l'EDD peut donner du sens aux savoirs de chimie. On peut lire dans ces réponses une intention de construire une CST à travers les enseignements de chimie, qui n'est finalement pas mise en œuvre dans les pratiques. Ces résultats résonnent avec les difficultés identifiées dans l'étude de Feierabend et al. (2011). Il s'agit là peut-être de la conséquence des tensions présentes dans les programmes, exposées précédemment.

Les individus qui constituent le profil 3 sont finalement ceux qui se disent les moins concernés par les problèmes environnementaux. Ils sont en désaccord avec la définition institutionnelle de l'EDD et considèrent que ce n'est pas le rôle de la discipline physique-chimie de les prendre en charge. Ils déclarent toutefois que l'EDD pourrait donner du sens aux savoirs de chimie. Par cette réponse, nous pourrions voir une intention d'enseigner la chimie principalement pour transmettre des savoirs disciplinaires. Notons également qu'il s'agit d'un petit effectif d'enseignants et d'enseignantes (5 % de l'échantillon). Ce décalage entre discours sur l'importance de l'EDD et défaut de mise en œuvre est également relevé par Feierabend et al. (2011).

Enfin, nous formulons quelques limites à cette enquête. Tout d'abord, l'ensemble des individus ont répondu que, selon eux, l'EDD était importante (question 1 de la partie 2, réponses allant de « très importante » à « plutôt importante »), y compris les individus du profil 3. Il est possible que la formulation de cette question induise un biais cognitif. En effet, les problèmes environnementaux sont des questions d'actualité, elles font l'objet de débats dans l'espace public et font appel aux valeurs des

individus. Il est donc possible que les individus choisissent inconsciemment de répondre « important » à cette question pour donner une image positive d'eux-mêmes (biais de désirabilité) ou pour répondre à une certaine réponse « socialement acceptable » (biais de conformisme social). Enfin, le nombre de réponses exploitables obtenu ne constitue pas un échantillon représentatif du corps enseignant de physique-chimie français au collège. Aussi, il est difficile de généraliser les résultats énoncés ci-dessus. Cependant, cette étude a permis d'identifier trois profils (plus ou moins) distincts dont nous venons de détailler les caractéristiques. En effet, les clusters dont sont issus ces profils se rejoignent dans le plan, révélant la conscience qu'ont les sujets enseignants des enjeux liés à l'EDD et leurs efforts pour l'intégrer à leurs enseignements de physique-chimie, voire de chimie spécifiquement. Cette distribution des individus dans le plan factoriel semble montrer qu'il n'y a pas des profils marqués de sujets enseignants bien informés qui intègrent l'EDD à leurs pratiques *versus* ceux qui ne le font pas, mais une pluralité de pratiques soutenues par une intention de transmettre une CST tout en enseignant les savoirs disciplinaires spécifiques, cette conciliation étant parfois difficile à mettre en œuvre.

### 3.3 Conclusion du chapitre

Dans ce chapitre, une étude de la littérature internationale sur les curricula identifie trois principales intentions pour l'enseignement scientifique, que nous retrouvons également dans les travaux qui étudient spécifiquement la chimie : la transmission de savoirs disciplinaires, la transmission de savoirs relatifs à l'épistémologie des sciences et la construction d'une CST qui permet de penser la relation science-société-environnement. Cette dernière vise en particulier à former des citoyens et citoyennes éclairés et responsables, face aux enjeux socioscientifiques qui préoccupent les instances prescriptrices (UNESCO, Commission européenne, gouvernements des États, etc.) — en particulier les problèmes environnementaux. Dans ce contexte, les recherches en didactique de la chimie identifient différentes approches pour aménager l'enseignement de savoirs disciplinaires et construction d'une CST : des entrées par les EA ou les QSV (Burmeister et al., 2012; Eilks et al., 2013; Flener-Lovitt, 2014), des approches où le réchauffement climatique sert d'élément de contexte pour aborder les savoirs de la chimie (Fahlman et al., 2018; Mahaffy, 2017), ou encore des approches complexes (Mohan et al., 2009; Zangori et al., 2017).

Notre étude des curricula de chimie français et suisse-romand (Sudriès et al., 2023) montre que dans ces deux contextes francophones, les intentions pour l'enseignement des sciences sont plus mises en tension que conciliées. Les approches identifiées par les recherches en didactique ne semblent pas contribuer au processus de transposition du savoir savant au savoir à enseigner — ou du moins cela n'est pas présenté de façon explicite dans les curricula.

Aussi, les travaux de van Driel et al. (2005) ; Markic et al. (2010) montrent que les sujets enseignants attribuent principalement une intention de transmission de savoirs disciplinaires à l'enseignement de la chimie, le rôle des savoirs de chimie pour penser la relation science-société-environnement ne vient que dans un second temps chez les sujets hollandais et n'apparaît pas chez leurs homologues allemands. Ces résultats sont à replacer dans le contexte de leur époque de production et sont nuancés par les résultats de Feierabend et al. (2011) et de notre étude des pratiques par questionnaire dans le contexte français (Sudriès & Cross, sous presse) qui montrent une certaine connaissance des enjeux de construction d'une CST des enseignants et enseignantes de chimie et du rôle de la discipline dans ce processus. Cependant, ces travaux pointent aussi les difficultés décrites par les sujets pour aménager l'enseignement des savoirs disciplinaires et construction d'une CST.

Par ailleurs, notre étude de curricula français et suisse-romand (Sudriès et al., 2023) met en évidence l'importance de la place accordée aux problèmes environnementaux dans les disciplines scolaires biologie/géographie/SVT, en particulier à travers l'utilisation d'un objet en particulier : le cycle du carbone. Le caractère complexe du cycle du carbone semble particulièrement pertinent pour investir les savoirs disciplinaires dans l'étude d'une question plus globale qui concerne la relation de l'être humain à l'environnement (Mohan et al., 2009; Zangori et al., 2017). Selon nous, « l'interdisciplinarité » prescrite dans les curricula francophones pour l'étude de telles questions vise en fait l'entrée dans une approche complexe du monde. Dans le chapitre qui suit, nous discutons l'utilisation de ce terme dans les textes officiels, ainsi que des approches « pluridisciplinaire », « transdisciplinaires », « adisciplinaires » ou « non disciplinaires » promues par les EA, à la lumière de la codisciplinarité (Chevallard, 2004). Nous démontrons également le potentiel du cycle du carbone en tant qu'objet codisciplinaire pour intégrer les problèmes environnementaux au curriculum de chimie.

**DEUXIÈME PARTIE : OUTILS THÉORIQUES, VERS LA  
PROBLÉMATISATION**

## CHAPITRE 4 — NOTRE PROPOSITION : LA CODISCIPLINARITÉ POUR ABORDER UN PROBLÈME COMPLEXE

Dans ce chapitre, nous discutons plusieurs modèles de la collaboration des disciplines scolaires, dans l'objectif d'intégrer un problème complexe à l'enseignement de la chimie au secondaire. Dans les deux premières parties, nous présentons les différentes formes que cette collaboration peut prendre et les critiques qui leur sont adressées, afin d'introduire la codisciplinarité au sens de Chevallard (2004). Dans une troisième partie, nous discutons du potentiel codisciplinaire du cycle du carbone, en particulier sa fonction d'objet-relais favorable à l'enseignement du réchauffement climatique en classe de chimie. En appui sur des analyses épistémologique, historique et philosophique, nous montrons en quoi le cycle du carbone peut contribuer à la dimension scientifique du réseau conceptuel élaboré pour répondre au problème complexe flou (au sens de Fabre, 2021) qu'est le réchauffement climatique.

### 4.1 Les limites des approches a-/inter-/pluri-/transdisciplinaires pour enseigner les questions environnementales

#### 4.1.1 Des concepts travaillés en sciences humaines et sociales

Nous avons introduit dans les chapitres précédents plusieurs termes pour désigner la collaboration des disciplines scolaires dont « interdisciplinarité » et « transdisciplinarité ». Nous allons à présent définir chacun de ces termes depuis leur contexte d'émergence, et mettre en évidence leurs limites.

Tout d'abord, la collaboration des disciplines académiques est un sujet qui préoccupe les sciences humaines et sociales (SHS) dans leur ensemble. Par exemple, Valade (1999) interroge la possible interdisciplinarité entre sociologie, philosophie et psychologie. Resweber (2011) replace l'interdisciplinarité en sciences sociales entre pluridisciplinarité et transdisciplinarité. Il donne pour exemple d'interdisciplinarité une anthropologie herméneutique émergeant au croisement des perspectives de la psychanalyse, des SHS et de la philosophie. Enfin, Darbellay (2014) met en doute la pertinence des limites disciplinaires dans le contexte des *cultural studies*.

Du point de vue des sciences de l'éducation, le *Dictionnaire actuel de l'éducation* (Legendre, 2005) propose de décrire l'interaction des disciplines dans l'étude d'un problème ou d'un objet à l'aide du continuum d'approches suivant : monodisciplinarité — pluridisciplinarité — multidisciplinarité — interdisciplinarité — transdisciplinarité.

La monodisciplinarité est définie comme une approche centrée sur une seule et unique discipline.

La pluridisciplinarité et la multidisciplinarité correspondent à des approches impliquant plusieurs disciplines (quelques-unes seulement pour la première, davantage pour la seconde), traitées de façon juxtaposée.

Selon Legendre (2005), l'interdisciplinarité désigne d'une part la collaboration des disciplines, notamment dans l'étude d'un objet ou d'un problème commun (définition scientifique), d'autre part « l'approche de l'enseignement autour d'un thème ou d'un projet servant à l'étude de quelques ou plusieurs disciplines intégrées » (p. 796) (définition pédagogique).

Enfin, la transdisciplinarité est définie comme le plus haut degré de collaboration des disciplines dans l'étude d'un problème ou d'un objet. Celle-ci aboutit à la formation d'une nouvelle discipline, par la transgression des domaines et la mise en commun des savoirs et des méthodes. D'un point de vue

épistémologique, la transdisciplinarité constitue un métaniveau de connaissances ou de méthode, considéré comme « non-spécifique » (p. 1402).

Deux remarques à propos de ces définitions. Premièrement, elles sont le fruit d'une réflexion épistémologique sur les rapports entre les disciplines scolaires au sens des approches transversales en sciences de l'éducation et nous pouvons nous demander ce qu'en font les didactiques des disciplines, en particulier quel est le statut des savoirs spécifiques dans ces collaborations. Deuxièmement, nous réfléchissons à ce que ces définitions établies au début des années deux-mille conservent « d'actuel » à l'heure où nous rédigeons ce chapitre. En effet, la définition de projets interdisciplinaires dépend en partie des prescriptions officielles, elles-mêmes orientées par les décisions des instances internationales (cf. 1.2). La fonction de tels projets peut donc évoluer au cours du temps, et même conserver un certain flou, nous allons le montrer.

#### 4.1.2 Le point de vue des approches disciplinaires

Schneuwly (2016) définit l'interdisciplinarité promue par le PER, sur le modèle des programmes scolaires français, comme une forme de pédagogie qui vise à donner « du "concret", voire "peut-être du sens tout court" grâce à des projets pratiques croisant les disciplines » (p. 6). Nous retrouvons les dimensions de la définition « pédagogique » de l'interdisciplinarité selon Legendre (2005). Deux autres définitions proposées par Schneuwly (2016) permettent de reconstruire en creux la définition institutionnelle de l'interdisciplinarité : *transdisciplinarité* et *pluridisciplinarité*.

Selon cet auteur, la transdisciplinarité fait référence à un niveau épistémologique considéré comme non spécifique. Il s'appuie pour cela sur la définition de Legendre (2005) que nous avons exposée ci-dessus. Quant à la pluridisciplinarité, Schneuwly (2016) désigne par ce terme le traitement d'« un même problème par plusieurs disciplines » (p. 9). Dès lors, les épistémologies propres des disciplines sont convoquées dans l'étude du problème. Cette définition se rapproche, selon nous, du traitement d'un problème complexe au sens de Morin (1982) et de la définition « scientifique » de l'interdisciplinarité selon Legendre (2005).

Schneuwly (2016) identifie également un certain nombre de problèmes à une interdisciplinarité pensée comme la solution pour donner du sens aux savoirs disciplinaires trop abstraits. Il décrit en particulier une perte de repères pour l'élève, en dehors des bornes familières des démarches des disciplines scolaires et face à un objet d'étude invisibilisé. Mais aussi, des difficultés pour les sujets enseignants pour organiser une progression dans la transmission de savoirs, puisque ces derniers sont issus de disciplines possédant des épistémologies propres (p. 8). Cet auteur plaide donc pour le fonctionnement autonome des disciplines scolaires et envisage leur possible collaboration dans l'étude d'un problème commun à condition de préserver leurs démarches et leurs méthodes à travers une démarche pluridisciplinaire.

#### 4.1.3 Le point de vue de l'approche interdisciplinaire

Dans le contexte québécois, une approche interdisciplinaire de l'enseignement scolaire est développée dans les recherches depuis une trentaine d'années (Lenoir, 1991, 2015, 2020; Lenoir & Hasni, 2016; Lenoir & Sauvé, 1998).

Lenoir et Sauvé (1998) définissent l'interdisciplinarité comme :

la mise en relation de deux ou de plusieurs disciplines scolaires qui s'exerce à la fois sur les plans curriculaire, didactique et pédagogique et qui conduit à l'établissement de liens de complémentarité ou de coopération, d'interpénétrations ou d'actions réciproques entre elles sous

divers aspects (finalités, objets d'études, concepts et notions, démarches d'apprentissage, habiletés techniques, etc.), en vue de favoriser l'intégration des processus d'apprentissage et des savoirs chez les élèves. (p. 12)

Cette définition va plus loin que la proposition de pluridisciplinarité avancée par Schneuwly (2016), puisqu'elle s'exprime au niveau des curricula, c'est-à-dire au niveau de définition même des disciplines scolaires. Ainsi, Lenoir et Sauvé (1998) promeuvent une interdisciplinarité dans l'enseignement scolaire au service de l'étude de la complexité, mais sans négliger l'apprentissage des savoirs et des démarches des disciplines impliquées. En effet, selon cette approche, l'interdisciplinarité permet non seulement une contextualisation favorable aux apprentissages des savoirs et des démarches disciplinaires, mais aussi le développement de compétences transversales (par exemple des capacités communicationnelles) (Lenoir & Hasni, 2016). Cependant, Lenoir (2015) critique les approches « transdisciplinaires » qui visent à contextualiser les savoirs à tout prix, au détriment de la structure des disciplines scolaires. En cela, il s'oppose à la transdisciplinarité telle que définie par Legendre (2005) ; Schneuwly (2016).

Ces éléments font écho à la définition de l'interdisciplinarité proposée par Martinand (2008). Dans le contexte de la difficile insertion des problèmes environnementaux dans les disciplines scolaires, cet auteur préconise une approche *interdisciplinaire* de l'EDD, en écho à la « multiréférentialité » (p. 1) des recherches sur l'environnement, qui demandent de concilier savoirs scientifiques et savoirs issus des SHS. Nous interprétons cette définition comme le traitement de la complexité, inhérente aux problèmes environnementaux. Pour cet auteur, l'approche interdisciplinaire permet de répondre aux problèmes, mais suppose des compétences « transdisciplinaires » (p. 1) de la part des chercheurs et chercheuses. C'est alors la transposition de ces compétences dans le cadre des disciplines scolaires qui peut s'avérer difficile.

En effet, ces définitions théoriques de l'interdisciplinarité rencontrent des limites lors de leur mise en œuvre dans les classes. À ce propos, Lenoir (2015) identifie une « juxtaposition » (p. 3) des disciplines scolaires, sans mise en perspective de leurs enjeux et de leurs contenus, sinon dans une articulation artificielle qui néglige leurs spécificités épistémologiques. Aussi, il critique les approches thématiques qui apportent plus de confusion aux élèves que d'opportunités de collaborations disciplinaires. Les études de Urgelli (2008) ; You et al. (2021), présentent deux exemples de mise en œuvre discutables de l'interdisciplinarité au service du traitement de la complexité (au sens de Lenoir, 2015 ; Martinand, 2008), qui vont dans le sens des mises en garde formulées par Lenoir (2015).

Premièrement, Urgelli (2008) cherche à mettre en évidence « les dimensions interdisciplinaires, complexes et controversées » (p. 108) du changement climatique chez deux équipes d'enseignants et enseignantes de lycée (secondaire II, France) de spécialités différentes : physique-chimie, histoire-géographie, sciences économiques et sociales (SES), SVT ou encore philosophie. Les équipes collaborent pendant une durée de huit mois pour l'élaboration d'une séquence interdisciplinaire à propos du changement climatique. Les résultats montrent la conservation des spécificités épistémologiques de chaque discipline convoquée pour l'étude de la complexité, notamment à travers la détermination d'objectifs d'apprentissages propres à chaque domaine (démarche expérimentale en sciences, développement de l'esprit critique en SHS). Aussi, la séquence élaborée reste très ancrée dans les disciplines scolaires, prenant peu de distance avec les contenus existants. Malgré la volonté d'élaborer un enseignement interdisciplinaire, les sujets enseignants restent centrés sur des approches disciplinaires, laissant aux élèves la responsabilité de tisser les liens de la complexité.

Ouvrons une parenthèse à propos de la dimension controversée du changement climatique. Nous reprenons ci-dessus l'expression de l'auteur (Urgelli, 2008). Cependant, à l'instar de Maron et al. (2022) nous pensons que la dimension controversée de l'origine anthropique du réchauffement climatique s'est dissipée au cours des décennies qui nous séparent de ces écrits, en particulier dans la majorité des communautés scientifiques, grâce aux modèles élaborés par le Groupe intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) publiés dans ses cinquième et sixième rapports (GIEC, 2014, 2021). Le réchauffement climatique n'en demeure pas moins un problème complexe au sens de Morin (1982).

Fermons cette parenthèse théorico-sémantique pour développer le deuxième cas de mise en œuvre difficile de l'interdisciplinarité au secondaire. You et al. (2021) définissent dans leur étude une approche d'enseignement interdisciplinaire qui permet la collaboration des disciplines scolaires, notamment par le croisement de leurs perspectives épistémologiques. Pour cela, il et elles proposent une entrée par le cycle du carbone, objet complexe par nature, et élaborent une grille de codage pour mesurer le taux d'interdisciplinarité dans les réponses des élèves (secondaire II et début du supérieur). Dans le cadre de cette étude, les savoirs scientifiques nécessaires pour comprendre le cycle du carbone sont considérés comme déjà connus des élèves, ils ne sont pas explicitement pris en charge par le dispositif. Leurs résultats montrent moins de 50 % d'interdisciplinarité dans l'ensemble des réponses des élèves. Ce taux est encore plus faible chez les élèves de secondaire II (16 %).

Ces deux exemples vont dans le sens des résultats de la revue de littérature internationale de Tonnetti et Lentillon-Kaestner (2023) à propos de la mise en œuvre de l'interdisciplinarité dans l'enseignement secondaire. Leur travail montre d'une part le faible nombre de cas de séquences interdisciplinaires à ce niveau d'enseignement, d'autre part, les difficultés que de telles mises en œuvre rencontrent, conduisant le plus souvent à des enseignements pluri/multidisciplinaires où les disciplines cohabitent sans collaborer. C'est un fait, malgré le potentiel d'un enseignement interdisciplinaire mis en avant par les travaux de Lenoir et Sauvé (1998) et Martinand (2008), l'interdisciplinarité dans les prescriptions officielles reste implicite et peu définie.

#### 4.1.4 L'interdisciplinarité dans les textes officiels francophones

Dans les programmes scolaires français tout d'abord, le terme interdisciplinarité apparaît notamment dans l'introduction du programme de cycle 4. Des « projets interdisciplinaires » sont prescrits pour illustrer la contribution des disciplines scolaires aux objectifs du Socle commun de connaissances, de compétences et de culture, en particulier au Domaine 3 relatif à la « Formation de la personne et du citoyen » (Ministère de l'Éducation nationale, de la jeunesse et des sports, 2018, p. 7). Dans ce cadre, un « enseignement pratique interdisciplinaire » (EPI) est promu au collège. Visant la collaboration « d'au moins deux disciplines, ils permettent de construire et d'approfondir des connaissances et des compétences inscrites dans les programmes d'enseignement. » (Ministère de l'Éducation nationale, de la jeunesse, des sports et des jeux olympiques et paralympiques, 2024). De plus, la mention de projets et de démarches interdisciplinaires apparaît dans les exemples de « croisements entre enseignements » qui illustrent les connaissances et les compétences associées à chaque discipline. Toutefois, aucune indication quant à la mise en œuvre concrète d'une telle interdisciplinarité en classe — qui plus est dans des classes différentes prises en charge par des enseignantes et enseignants spécialistes de leur discipline au collège — n'est mentionnée (Figure 33).

## Croisements entre enseignements

Quelques exemples de thèmes qui peuvent être travaillés avec plusieurs autres disciplines sont proposés ci-dessous. Cette liste ne vise pas l'exhaustivité et n'a pas de caractère obligatoire. Dans le cadre des enseignements pratiques interdisciplinaires (EPI), monde économique et professionnel la diversité des métiers de la science peut être explorée.

### Corps, santé, bien-être et sécurité

- » En lien avec les SVT, la technologie  
**Sécurité, de la maison aux lieux publics** : usage raisonné des produits chimiques, pictogrammes de sécurité, gestion et stockage des déchets chimiques au laboratoire, risque électrique domestique. Sécurité pour soi et pour autrui : risque et gestion du risque.
- » En lien avec l'EPS, les SVT, les mathématiques, la technologie.  
**Chimie et santé** : fabrication des médicaments, prévention.

Figure 33 : exemple de « croisements entre enseignements » proposés dans le programme de physique-chimie (MEN, 2018, p.118)

Dans le PER, si le terme « interdisciplinaire » apparaît dans les objectifs de Formation générale relatifs au cycle 3 (CIIP, 2010b), il est inexistant dans les prescriptions des différents domaines disciplinaires. Les liens entre ces domaines sont encouragés par des mentions dans les chapeaux des thèmes, sans que les contenus concernés soient explicités (Figure 34).

PHÉNOMÈNES NATURELS ET TECHNIQUES	Progression des apprentissages		
	9 <sup>e</sup> année	10 <sup>e</sup> année	11 <sup>e</sup> année
<b>MSN 36 – Analyser des phénomènes naturels et des technologies à l'aide de démarches caractéristiques des sciences expérimentales...</b>			
			<p>1 ... en formulant des hypothèses</p> <p>2 ... en acquérant les connaissances nécessaires en physique et en chimie</p> <p>3 ... en utilisant un modèle pour expliquer et/ou prévoir un phénomène naturel ou le fonctionnement d'un objet technique</p>
	<p><b>Matière</b></p> <p>Liens MSN 37 – Corps humain; MSN 38 – Diversité du vivant; SHS 31 – Relation Homme-espace; FG 3G – Environnement</p>		
	<p>Appropriation de la modélisation de la matière comme constituée de molécules et d'atomes (éléments, espèces chimiques)</p> <p>Représentation des quelques espèces chimiques simples de la vie quotidienne à l'aide d'une écriture symbolique (<math>O_2</math>, <math>H_2O</math>, <math>CO_2</math>,...)</p> <p>Comparaison des dimensions des particules élémentaires à l'Univers (proton, neutron, électron, atome, molécule, homme, Terre, système solaire, galaxies, Univers)</p> <p>Définition de la masse (quantité de matière) et du volume (espace occupé par les molécules)</p> <p>Caractérisation des substances par leur masse volumique</p> <p>Caractérisation des états (solide, liquide, gaz) de la matière par leurs propriétés macroscopiques et représentation de ces trois états à l'aide d'un modèle décliné à l'échelle des molécules</p> <p>Caractérisation des substances par leurs températures de changement d'état (<i>eau, métaux, roches,...</i>)</p> <p>Mémorisation de la composition de l'air</p> <p>Utilisation d'un modèle moléculaire pour interpréter, en termes d'agitation moléculaire et de liaison intermoléculaire, le changement de température et le changement d'état physique et pour donner du sens à quelques phénomènes et grandeurs physiques : température, dilatation, variation de pression des gaz, évaporation, et faire le lien avec des phénomènes atmosphériques</p> <p>Différenciation des transformations physiques et des transformations chimiques à l'échelle macroscopique et microscopique (<i>changement d'état, distillation, électrolyse de l'eau, pyrolyse du sucre,...</i>)</p> <p>Modélisation des transformations chimiques par des réactions chimiques (équation chimique) en se limitant principalement aux éléments carbone, hydrogène et oxygène</p> <p>Compréhension du principe de conservation de la matière par celle des atomes en utilisant le modèle de la réaction chimique, pour des cas simples, en se limitant à quelques combustions (<i>carbone, hydrogène, méthane, fer,...</i>)</p>		

Figure 34 : exemple de lien suggéré dans les chapeaux des domaines du PER MSN 36 (surligné en gris en haut de la page) (CIIP, 2010d, p. 5)

Il semble donc que la définition institutionnelle de l'interdisciplinarité s'incarne dans une dimension pratique, par la collaboration des disciplines dans la mise en œuvre de projets communs (EPI en France). Cette définition ne semble pas considérer les dimensions épistémologiques des disciplines concernées. De même qu'elle ne vise pas directement à répondre à un problème identifié, apanage de la pluridisciplinarité au sens de Schneuwly (2016). Ces éléments ne donnent pas davantage d'indices quant à la mise en œuvre de tels projets communs en classe ni sur les objectifs d'enseignement-apprentissages alors visés, si ce n'est une recherche de sens qui nous paraît très vague.

Nous retrouvons cette impression de flou à la lecture de l'étude de McCright et al. (2013), pourtant centrée sur la promotion de l'interdisciplinarité<sup>45</sup> à travers une séquence d'enseignement. Aucune référence dans le texte ne permet de comprendre dans quel sens ce terme est entendu. Nous reconstruisons sa définition sur la base des résultats obtenus qui décrivent l'élaboration par des sujets enseignants du secondaire d'un projet d'enseignement impliquant plusieurs disciplines. Par conséquent, nous l'entendons comme la définition institutionnelle de l'interdisciplinarité. Cet exemple issu des recherches anglophones montre l'implicite et le flou qui accompagnent le terme, à la fois dans les prescriptions officielles, mais aussi — et en conséquence — dans les pratiques de recherche et d'enseignement-apprentissage. Le cas des « Éducatons à... » en est un exemple saillant.

#### 4.1.5 Le cas des « Éducatons à... »

Les EA apparaissent comme des objets émergents dans les curricula internationaux au début des années deux-mille, sous l'injonction des instances internationales.

À propos des rapports de l'être humain à l'environnement, puisque ce sont les problèmes mis à l'étude dans notre travail, citons l'Éducation relative à l'environnement (ÉRE) préconisée par l'UNESCO (2002) et contextualisée en France comme une Éducation à l'environnement (ÉE). L'ÉE est rapidement transformée en Éducation à l'environnement dans une perspective de développement durable (ÉEDD) pour donner suite à la « Stratégie nationale du développement durable » de 2003 puis en Éducation au développement durable (EDD) (Girault & Sauvé, 2008). Ce mouvement se poursuit dans le courant des années 2010, jusqu'à aujourd'hui. Citons notamment le programme Éducation 2030 de l'UNESCO (2016) et le Rapport de Berlin sur l'EDD (UNESCO, 2021).

L'émergence des EA bouscule les frontières disciplinaires pour aborder des problèmes complexes à l'école. Dès lors, elles se positionnent dans la niche des approches interdisciplinaires. Or, la nature des savoirs qu'elles mettent en jeu paraît difficile à définir. En effet, nous relevons différentes définitions dans les recherches qui s'intéressent aux EA : Lange et Victor (2006) les décrivent comme intrinsèquement « non disciplinaires » (p. 4), Martinand (2008) définit l'EDD comme « interdisciplinaire » (cf. 4.1.3), enfin Lange et Barthes (2021) qualifient les EA comme « adisciplinaires et transversales » (p. 129). Lange et Victor (2006) ; Lange et Barthes (2021) soulignent en effet l'ancrage hors des disciplines scolaires des savoirs qui les constituent. S'il nous est difficile de distinguer l'expression « non disciplinaire » de « adisciplinaire » — dont le préfixe de privation « a- » tend, de notre point de vue, à rendre l'expression synonyme de la première —, la dimension transversale proposée par Lange et Barthes (2021) place la définition à un niveau méta, c'est-à-dire à côté des disciplines scolaires. Ainsi, nous serions tentées de la rapprocher de la transdisciplinarité telle que définie par Legendre (2005) ; Schneuwly (2016). Lenoir (2015) formule de vives critiques à l'encontre

---

<sup>45</sup> *Promoting interdisciplinarity through climate change education* (McCright et al., 2013, notre traduction).

de telles démarches, nous venons de le montrer. De plus, selon Martinand (2016), la dimension non disciplinaire attribuée aux savoirs des EA interroge les conditions de leur prise en charge dans des disciplines scolaires cloisonnées.

Cet auteur identifie, au moment de l'émergence de l'EDD, le passage d'un curriculum défini en termes de savoirs à un curriculum relatif à des compétences. Il souligne également la dimension politique convoquée par le développement durable qui prend le pas sur les savoirs scientifiques et rend ses problèmes difficiles à enseigner à l'école, car souffrant d'un « défaut de scientificité » (Martinand, 2016, p. 27). Il ajoute que la dimension complexe de l'EDD, émergeant d'un contexte sociopolitique, est difficile à appréhender pour les enseignants et enseignantes, d'autant plus que leur articulation aux savoirs scolaires n'est pas pensée. Ceci aboutit, d'un côté à un sentiment d'illégitimité, d'un autre côté à certains cas de dérives militantes pour celles et ceux qui sont engagés sur le plan personnel — ce que Schneuwly (2016) nomme « dérives idéologiques » (p. 9).

Dans la même lignée, Fabre (2014) identifie trois obstacles à l'insertion des EA dans les disciplines scolaires qui reprennent les critiques formulées par Martinand (2016) :

- le réductionnisme scientifique et technique, qui conduit à résumer le problème complexe à sa seule dimension scientifique, en occultant ses dimensions politiques et éthiques fondamentales ;
- le relativisme, soit la négligence des dimensions scientifiques et techniques des problèmes conduisant à des débats d'opinions sans toutefois apporter aux élèves les éléments suffisants pour élaborer une opinion éclairée ;
- le militantisme des « bonnes pratiques » (paragr. 16), posture dogmatique qui empêche toute autonomie de la pensée.

Selon Chauvigné et Fabre (2021), ces obstacles peuvent provoquer des difficultés de positionnement aux sujets enseignants, dont

le problème de neutralité, ou difficulté à trouver une posture d'équilibre entre militantisme et moralisme — dans les faits, cette difficulté produit le plus souvent un enseignement relativiste. Ou encore le problème de partialité exclusive, lorsque l'enseignante ou l'enseignant veut rallier les élèves à son point de vue sur le problème, mettant de côté la formation à la pensée critique et la réflexivité (p. 22).

En s'appuyant sur les travaux de Fabre (2014), Orange Ravachol (2014) va jusqu'à désigner une forme de *dédisciplinarisation* provoquée par l'EDD. Cette autrice identifie notamment une problématisation incomplète (au sens de Fabre & Orange, 1997) des problèmes environnementaux à l'école qui conduit le plus souvent à négliger leurs dimensions scientifiques et techniques au profit des dimensions éthique et politique (p. 4). Ces constats expliquent selon elle la réticence — ou « inertie » — des disciplines scolaires à intégrer l'EDD. De plus, cette autrice souligne que l'étude d'un objet commun par des disciplines différentes conduit le plus souvent à des rapprochements thématiques sans émergence de problèmes convergents, ce qui pose un problème épistémologique. Elle formule alors l'hypothèse selon laquelle l'EDD pourrait provoquer un double phénomène de dédisciplinarisation et de redisciplinarisation. Les résultats de ses études de cas montrent une tendance à la dédisciplinarisation. L'enseignante peine en effet à tenir ensemble les enjeux scientifiques et les enjeux sociaux, de sorte que l'on observe une dérive vers le pôle scientifique ou le pôle humain au cours de la séquence. Ceci conduit *in fine* à des problèmes d'acquisition des savoirs scientifiques, autant qu'à un échec de formation vis-à-vis des enjeux de citoyenneté. Ancrée dans le cadre de la problématisation, Orange Ravachol (2014)

explique l'inefficacité de l'EDD en termes d'instruction scientifique et d'éducation citoyenne par la construction de *problèmes complexes flous*.

En effet, Fabre (2021) identifie dans les objectifs des EA un effacement de l'instruction scientifique au profit de la formation citoyenne. Ainsi, selon cet auteur, les problèmes introduits par les EA sont radicalement différents des problèmes dits *cartésiens*, habituellement abordés dans l'enseignement scolaire, c'est-à-dire des problèmes déterminables, solubles, selon une démarche explicitable et disposant de solutions objectivables. En appui sur la littérature anglophone, cet auteur identifie alors trois types de problèmes qui émergent des EA :

- les *problèmes mal structurés*, dont la démarche de résolution ne peut être réduite par un algorithme, et qui ne possèdent pas de critères définis comme solutions ;
- les *problèmes complexes flous*, constructions sociales qui émergent de controverses. De fait, leur élaboration dépend de savoirs, mais aussi de valeurs et d'intérêts. Ils présentent plusieurs solutions possibles, qui dépendent en partie de décisions politiques, mais aussi de critères techniques et d'acceptabilité vis-à-vis de la société (p. 92).
- les *problèmes pernicieux* et *super-pernicieux*, formes aggravées des problèmes complexes flous, à cause notamment de leur caractère insoluble, des multiples interprétations qu'on peut leur inférer et de leur caractère symptomatique d'autres problèmes (p. 93).

Problèmes mal structurés, problèmes complexes flous et problèmes (super-)pernicieux partagent cinq dimensions communes : la complexité, la polysémie, la conflictualité, la temporalité critique (liée au caractère irréversible des tentatives de solutions mises en œuvre) et l'ouverture (absence de solution). Ainsi, Fabre (2021) propose un gradient de problématicité, sur lequel ces problèmes peuvent être rangés selon l'importance de chacune des cinq dimensions (Figure 35). Par exemple, à l'instar de Lazarus (2009, cité par Fabre, 2021, p. 94), il considère le changement climatique comme un problème super-pernicieux en raison de l'intrication de ses dimensions techniques, bio-géo-chimiques, économiques et politiques, mais surtout à cause des caractères irréversible et global de ses conséquences.

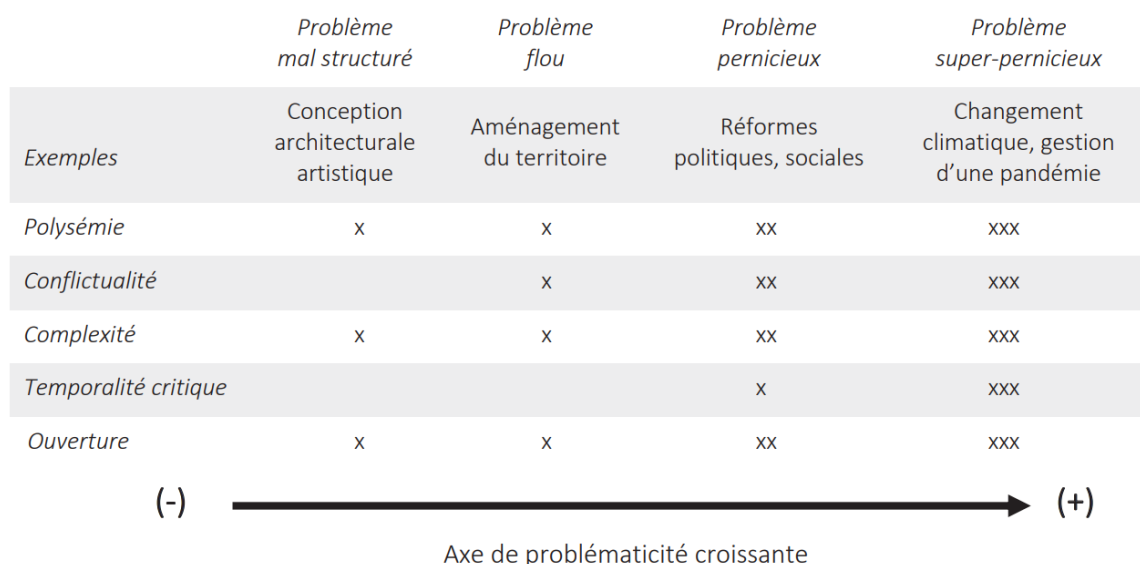


Figure 35 : gradient de problématicité d'après Fabre (2021, p. 95)

Aussi, soucieuse de la précision de nos propos, nous choisissons de distinguer le problème du changement climatique, du problème du réchauffement climatique d'origine anthropique, problème que

nous considérons « complexe flou », en tant que sous-problème du premier, du fait de la diminution de ses dimensions complexité, conflictualité et temporalité critique. Notre positionnement en faveur d'une moindre controverse de la question du réchauffement climatique (cf. 4.1.3) pourrait paraître en opposition avec la dimension de conflictualité qui contribue à la définition du gradient de problématique de Fabre (2021). Toutefois, l'auteur précise que la dimension conflictuelle fait référence aux scénarii de réponses envisageables pour le problème considéré. Aussi, « pour prévenir la dilution de la notion » (p. 95), il préconise une hiérarchisation des dimensions dans la définition d'un problème complexe. En d'autres termes, Fabre (2021) propose de définir le caractère d'un problème, quand bien même il ne dispose que de quelques-unes des cinq dimensions.

Enfin, les travaux de Fabre apportent des éléments à notre réflexion sur la difficile intégration des EA à l'école. Aussi, au-delà de ce cas particulier, il ressort des travaux sur l'insertion des problèmes environnementaux à l'école, la difficile prise en charge de leur complexité (Fabre, 2021; Martinand, 2008, 2016; Orange Ravachol, 2014; Urgelli, 2008; You et al., 2021). Ces constats, ainsi que les critiques adressées à l'encontre des EA et de la définition institutionnelle de l'interdisciplinarité, pourraient trouver leur origine dans le caractère prescriptif de l'ensemble de ces approches, relevé par Lowe (2002). C'est pourquoi nous plaidons en la faveur d'une approche centrée sur la transposition didactique des savoirs pour comprendre la collaboration des disciplines scolaires dans l'étude d'un problème complexe. À cette fin, nous proposons d'examiner le potentiel de la *codisciplinarité* au sens de Chevallard (2004), en tant que forme spécifique d'interdisciplinarité.

#### 4.2 La codisciplinarité au sens de Chevallard (2004)

Depuis le point de vue de la didactique des mathématiques, Chevallard (2004) interroge la collaboration des disciplines prescrite par les programmes des classes préparatoires aux grandes écoles (CPGE) à partir de 1995 en France, puis intégrée au programme de première en 2000 sous la forme des travaux personnels encadrés (TPE) et au programme de cycle 4 (classe de 5<sup>e</sup>) en 2002 avec les itinéraires de découverte (IDD). Chevallard (2004) identifie dans ces dispositifs interdisciplinaires institutionnels un « schéma épistémologique commun », qu'il nomme « parcours d'étude et de recherche » (p. 8), en appui sur la Théorie anthropologique du didactique. À titre d'exemple, il propose l'étude en terminale scientifique<sup>46</sup> de la question de la dangerosité de la radioactivité, dont il souligne la complexité. Répondre à cette question suppose selon lui une « synergie entre plusieurs disciplines » qui demande une approche « *codisciplinaire*<sup>47</sup> », au service du parcours d'étude et de recherche<sup>48</sup> (p. 8). La proposition de Chevallard (2004) ouvre de nouvelles perspectives de définition pour la collaboration des disciplines scolaires, sans que l'auteur donne d'exemples concrets de mise en œuvre. À travers notre travail de recherche, nous proposons de nous positionner dans cette niche et d'étudier les conditions d'une telle mise en œuvre.

Nous trouvons dans les travaux d'Otero et al. (2016), un exemple d'étude d'un parcours d'étude et de recherche au sens de Chevallard (2004). Ces autrices mobilisent le concept de codisciplinarité pour

---

<sup>46</sup> Dénomination en cours avant la réforme du baccalauréat de 2018 en France (Décret n° 2018-614 du 16 juillet 2018 modifiant les dispositions du code de l'éducation relatives aux enseignements conduisant au baccalauréat général et aux formations technologiques conduisant au baccalauréat technologique, 2018) pour désigner une filière où les disciplines scientifiques (mathématiques, physique-chimie, SVT) sont majoritaires en termes de temps d'enseignement et de coefficients à l'examen.

<sup>47</sup> En italique dans le texte.

<sup>48</sup> Le concept est initialement introduit par Blanchard-Laville (2000) selon une approche psychanalytique du fonctionnement des équipes de recherche pluridisciplinaires.

l'étude d'une situation d'enseignement-apprentissage impliquant la physique et les mathématiques. Le parcours d'étude et de recherche est étudié à l'échelle de trois systèmes didactiques :

- une équipe de recherche impliquant deux mathématiciens et un physicien,
- un cours d'université concernant des enseignants et enseignantes de mathématiques en dernière année de formation,
- une classe de mathématiques de lycée (élèves de 16-17 ans).

Elles proposent de résoudre le problème suivant : « Pourquoi la *Piedra Movediza* de Tandil est-elle tombée ? »<sup>49</sup> à travers une méthode d'enseignement par la recherche (Figure 36).



Photography of the Movediza Stone (Photo File General of the Argentina Nation, available in: <http://bibliocicop.blogspot.com.ar/2012/02/piedra-movediza-100-anos-de-su-caida.html>)

Figure 36 : photographie de la Piedra Movediza à Tandil (Argentine) à partir de laquelle le problème codisciplinaire est construit

L'analyse se fait en termes de description du parcours d'étude et de recherche pour chaque niveau. Les résultats montrent l'élaboration d'un modèle codisciplinaire pour l'étude de la situation aux trois niveaux de l'étude. En particulier la nécessaire articulation des modèles physiques et mathématiques pour modéliser la situation dans l'objectif de répondre à la question initiale. L'analyse a priori des savoirs impliqués dans la résolution de la question « Pourquoi la *Piedra Movediza* de Tandil est-elle tombée ? » met en évidence l'intrication des modèles mécaniques (physique) et de leur représentation par des équations différentielles (mathématiques). La réponse à la question repose alors sur la résolution de ces équations. Les résultats à l'échelle du groupe de recherche et à l'échelle de la formation, montrent que le traitement de la question amène les sujets à établir et à résoudre ces équations différentielles (au moins dans un des deux groupes de formation). À l'échelle de la classe de mathématique du secondaire, les équations sont établies après une modélisation de la situation à l'aide des concepts physiques (oscillations mécaniques). L'étude des équations différentielles est ensuite soutenue par le logiciel *GeoGebra*<sup>50</sup>. Les autrices relèvent cependant une réticence initiale de la part des enseignants et

<sup>49</sup> « Why did the Movediza stone in Tandil fall down? » (Otero et al., 2016, p. 57, notre traduction).

<sup>50</sup> <https://www.geogebra.org/>

enseignantes de mathématiques du secondaire à mobiliser des modèles issus de la physique dans le cadre de leur cours.

Ces résultats apportent des éléments de définition à la codisciplinarité introduite par Chevallard (2004). Ils montrent, en particulier, l'élaboration progressive de la modélisation de la situation par la confrontation des matrices disciplinaires<sup>51</sup> impliquées (au sens de Develay, 1992) — et ainsi de leurs modèles, concepts et épistémologies. Cette confrontation fait émerger des questions/problèmes intermédiaires qui enrichissent la perspective de chaque discipline sur l'objet étudié, et sont progressivement résolus avec la contribution des modèles disciplinaires convoqués, jusqu'à la résolution du problème initial.

Toutefois, si le problème proposé par Otero et al. (2016) dispose d'une dimension complexe, il semble un problème cartésien au sens de Fabre (2021). Nous nous interrogeons alors sur le potentiel de l'approche codisciplinaire pour aborder un problème complexe flou tel que l'origine anthropique du réchauffement climatique. Par définition, de tels problèmes ne présentent ni question définie ni réponse strictement vraie ou fausse (Fabre, 2021). Nous nous demandons alors comment peut être mise en œuvre la codisciplinarité dans ces conditions. Notre étude cherche d'une part à construire une approche codisciplinaire pour l'étude de problèmes environnementaux dans le cadre des enseignements de chimie au secondaire I, d'autre part à élaborer des critères pour l'évaluation de cette codisciplinarité (cf. Chapitre 10). Cette démarche nous conduit à examiner un objet complexe qui puisse être enseigné en classe de chimie au secondaire : le cycle du carbone.

### 4.3 Un objet complexe : le cycle du carbone

#### 4.3.1 Un modèle biogéochimique

##### 4.3.1.1 Arrière-plans épistémologiques et philosophiques

###### 4.3.1.1.1 Arrière-plans épistémologiques communs à la biologie et à la géologie

Orange et Orange (1995) identifient deux modèles épistémologiques d'organisation des savoirs communs aux disciplines « biologie » et « géologie » : le *modèle à compartiments* et le *modèle à rétroaction*. Ces deux modèles sont particulièrement importants pour comprendre la structure des savoirs qui constituent le cycle du carbone.

Le modèle à compartiments met en relation des cases, « unités fonctionnelles ou de stockage » (Pavé, 1994, cité par Orange & Orange, 1995, p. 31), par des flèches. Ces flèches représentent des flux de matière ou d'énergie, quantifiables par une variable d'état qui correspond à la somme des flux d'entrée à laquelle on soustrait la somme des flux de sortie. Orange et Orange (1995) soulignent la fonction modélisante des compartiments, volontairement simplificatrice et arbitraire, et dépendante du problème auquel le modèle doit répondre. Ainsi il n'existe pas un, mais des cycles du carbone. Certains intègrent l'espèce humaine au même titre que les autres animaux, d'autres considèrent les activités humaines comme « non naturelles », nous y reviendrons. Quoi qu'il en soit, ces choix se font en fonction de ce que l'on cherche à représenter afin de comprendre, expliquer et prédire, c'est la fonction du modèle dans l'enseignement des sciences (cf. 2.2).

---

<sup>51</sup> « principe d'intelligibilité » ou « cadre de référence » d'une discipline donnée (Develay, 1992, p. 44).

Une autre caractéristique des modèles à compartiments relevée par Orange et Orange (1995) est la dimension dynamique des processus de transferts apportée par les flèches. Selon cette étude, l'émergence de tels modèles dans le cadre de la physiologie et de l'écologie rompt avec la tradition naturaliste d'une biologie cherchant à décrire et inventorier les éléments de la nature. On bascule alors dans la recherche de modélisation des mécanismes du vivant, changeant d'épistémologie et de méthode dans le même mouvement.

Le modèle de rétroaction contribue à la compréhension de ces mécanismes. En appui sur les modèles cybernétique et thermodynamique, le modèle de rétroaction sous-tend notamment le concept de régulation en biologie avec le couplage information-rétroaction. Orange et Orange (1995) relèvent également son rôle central dans la modélisation des interactions atmosphère-océans, mais également dans des systèmes plus complexes relevant « d'une double approche biologique et géologique » (p. 37), telle que la relation que le cycle du carbone entretient au climat.

Toutefois, représenter les activités anthropiques industrielles sur le même plan que les phénomènes biologiques de respiration animale ou de photosynthèse, et que des phénomènes géologiques tels que le volcanisme suppose un positionnement philosophique appelé « moniste », en opposition avec un positionnement dit « dualiste ». Dans la section qui suit, nous présentons brièvement ces deux courants philosophiques et quelques-unes de leurs implications en SHS.

#### 4.3.1.1.2 *Positionnement philosophique : l'être humain entre nature et culture*

Descola (2015) décrit une opposition entre la tradition moniste (au sens de Haeckel, 1905) des sociétés autochtones d'Amérique du Sud et la philosophie dualiste des pays industrialisés. L'ethnologue décrit que les premières se considèrent les égales des espèces végétales et animales avec lesquelles elles partagent l'environnement. Mêlant science et croyances dans leurs raisonnements, ces sociétés voient le monde comme un tout, tandis que les sociétés industrielles considèrent l'espèce humaine et ses productions comme exclues de la nature.

Pour Lévi-Strauss (2011), le père de l'anthropologie structuraliste, le dualisme se trouve plus dans la hiérarchie des concepts de nature et de culture, que dans leur opposition. Dans les sociétés primitives, en effet, la nature est à la fois « pré-culture » et « sous-culture ». De plus, dans la pratique religieuse de ces sociétés, la nature comprend une dimension « surnaturelle » imprégnée de culture (p. 81). Dans les sociétés industrielles, à l'inverse, la culture domine la nature.

Pour Lévi-Strauss (1973), la distinction entre nature et culture émerge à travers la distanciation des êtres humains aux autres espèces, ce que Rousseau identifie comme une disparition progressive de la pitié. Lévi-Strauss identifie en effet dans les écrits<sup>52</sup> de ce dernier le développement de la pitié chez les êtres humains en parallèle de l'apparition des sociétés, puis son déclin concomitant au développement du capitalisme :

On a commencé par couper l'homme<sup>53</sup> de la nature, et par le constituer en règne souverain ; on a cru ainsi effacer son caractère le plus irrécusable, à savoir qu'il est d'abord un être vivant. Et, en restant aveugle à cette propriété commune, on a donné champ libre à tous les abus. Jamais mieux qu'au terme des quatre derniers siècles de son histoire, l'homme occidental ne peut-il

---

<sup>52</sup> En particulier, *Discours sur l'origine et le fondement des inégalités parmi les hommes* (Rousseau, 1755).

<sup>53</sup> Comprendre « les êtres humains ».

comprendre qu'en s'arrogeant le droit de séparer radicalement l'humanité de l'animalité, en accordant à l'une tout ce qu'il retirait à l'autre, il ouvrait un cycle maudit, et que la même frontière, constamment reculée, servirait à écarter des hommes d'autres hommes, et à revendiquer, au profit de minorités toujours plus restreintes, le privilège d'un humanisme, corrompu aussitôt né pour avoir emprunté à l'amour-propre son principe et sa notion (Lévi-Strauss, 1973, p. 7)

Ainsi, la condition selon laquelle tous les êtres vivants sont semblables, qui fonde les lois, les mœurs et la vertu de la nature, pourrait disparaître avec l'élaboration des sociétés capitalistes dépourvues de pitié — et donc par définition sans loi, ni mœurs, ni vertu (p. 8).

Lévi-Strauss (2011) précise que s'il existe des activités économiques multiples — cueillette, chasse, agriculture, artisanat, etc. — les sociétés industrielles et primitives se distinguent dans leurs modes de production : « mentalité productiviste » *versus* productivité dite « par processus négatifs » (p. 75). Il identifie dans les sociétés capitalistes, une perte des dimensions philosophique, sociale et morale dans les modes de production industriels, plaçant l'individu comme un simple rouage sur la chaîne, entièrement orienté vers la production de richesses et de désordre. En comparaison, les sociétés primitives orientent leur production de richesses vers le développement de valeurs morales et sociales chez les individus impliqués, ne prélevant que ce qui est nécessaire à leur survie et produisant ainsi un minimum de désordre.

Pour Bensaude-Vincent (2021), enfin le concept d'anthropocène (cf. 1.2.1) pose un terme à la dualité nature/culture en imposant une vision anthropocentrée de l'époque géologique actuelle (p. 138). Cette autrice propose de contourner l'opposition traditionnelle par une lecture réflexive des temps des techniques et du politique et des rythmes des différentes choses qui composent le monde (Bensaude-Vincent, 2021, p. 16).

L'illustration de concepts philosophiques en SHS éclaire notre lecture des différentes représentations du cycle du carbone. Suivant une approche de tradition moniste, certains représentent les activités humaines dans le compartiment « biosphère » au même titre que la photosynthèse ou le volcanisme. D'autres représentations peuvent adopter une approche dualiste, et considérer un cycle du carbone « naturel », exempt de toute activité humaine industrielle, mais faisant figurer l'espèce humaine à travers la respiration et la décomposition, au même titre que les autres êtres vivants. Cette représentation peut être comparé à un cycle du carbone « anthropocène » qui représente l'influence des modes de vie capitalistes sur l'équilibre du cycle « naturel » avec les conséquences désastreuses sur les écosystèmes et les sociétés les plus vulnérables que nous connaissons aujourd'hui.

Il est intéressant de relever que les décisions politiques capitalistes à l'origine de nos sociétés industrielles et super-consommatrices (Descola, 2018) peuvent s'enraciner dans l'abandon par l'espèce humaine du sentiment de pitié vis-à-vis des autres êtres vivants au sens de Rousseau (cité par Lévi-Strauss, 1973), et même vis-à-vis d'elle-même<sup>54</sup>, guidée par une technique orientée par la seule loi du profit. Ces notions, bien qu'essentielles pour comprendre la complexité de l'anthropocène, sont difficiles à schématiser du fait de leurs caractères historique et abstrait. Cette réflexion sur les dimensions philosophiques impliquées dans l'élaboration d'un cycle du carbone « naturel » ou d'un cycle du carbone

---

<sup>54</sup> Cette « elle-même » désigne une partie de l'humanité minorisée qui vit en dehors de tout système capitaliste, telle que la société autochtone d'Équateur étudiée par Descola (2015), les Achuar.

« anthropocène » soulève les dimensions politique et éthique qui pilotent les modes de vie de nos sociétés, mettant en évidence la complexité intrinsèque de cet objet. Complexité qui pourrait, selon nous, être prise en charge par un enseignement codisciplinaire. Avançons dans l'étude de cette hypothèse en considérant à présent l'histoire et l'épistémologie du cycle du carbone.

#### 4.3.1.2 Histoire et épistémologie du cycle du carbone

Dans son travail de thèse, Labbe Espéret (2002) qualifie le cycle du carbone de modèle *biogéochimique*, au sens de Rapp (1974, cité par Labbe Espéret, 2002), car « il met en relation les vivants par leurs cycles biologiques de courte durée, avec les éléments dans leur cycle géochimique de beaucoup plus longue durée, facteurs écologiques repérés dans le temps et dans l'espace » (p. 88). Le cycle du carbone est donc un concept écologique, qui met à plat les dimensions spatio-temporelles de façon à rapprocher les phénomènes biologiques et géochimiques ayant lieu entre vivant et non-vivant (Figure 37).

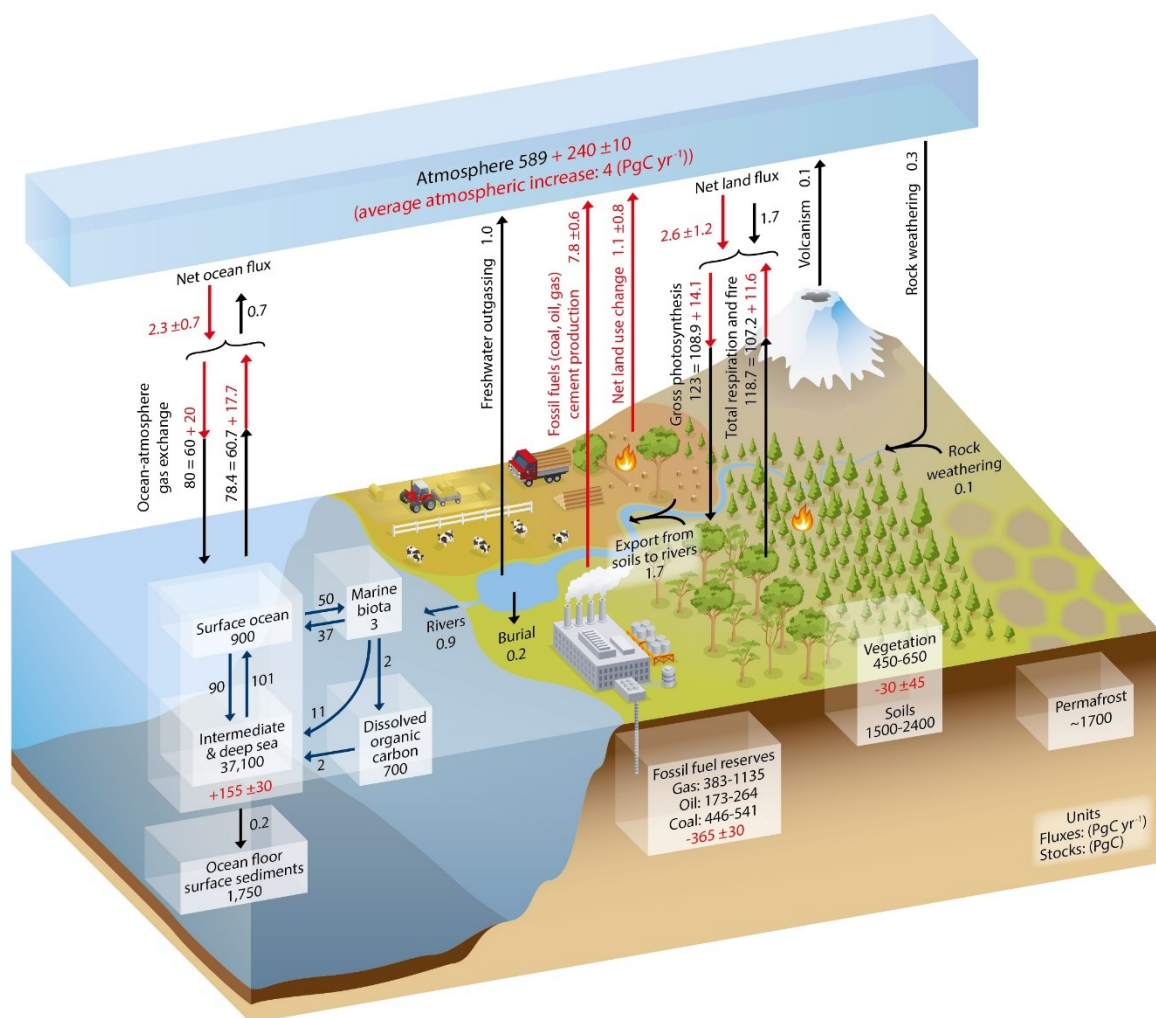


Figure 37 : cycle du carbone quantifiant l'influence des activités humaines sur la production de dioxyde de carbone atmosphérique (unité des flux : gigatonnes de carbone/an ; unité des stocks : gigatonnes de carbone) (IPCC, 2013)

Heymann et Dahan Dalmedico (2019) expliquent que l'émergence d'un tel modèle, au cours des années 1970, fût possible grâce à un changement de paradigme dans les sciences, tendant vers une

approche complexe du monde<sup>55</sup>. Deux éléments favorables à un tel changement dans le contexte socio-politico-culturel de l'époque sont identifiés : d'une part le contexte des crises pétrolières qui conduisit à une approche plus pessimiste du monde qu'au commencement de la guerre froide où l'optimisme se rangeait du côté des progrès techno-scientifiques, d'autre part un intérêt croissant des sciences et techniques pour le désordre et le chaos. De plus, au cours de la même décennie on observe une perte de monopole des mathématiques et de la physique théorique, disciplines reines jusqu'alors, au profit d'approches joignant biologie, physique et SHS pour l'étude du fonctionnement de la Terre et de la vie. Ainsi, le premier modèle de projection du climat est élaboré au début des années mille neuf cent quatre-vingt. Celui-ci ne disposait que d'une seule dimension — un seul compartiment au sens d'Orange et Orange (1995), se centrant sur l'atmosphère. Les progrès de l'informatique au cours de la décennie suivante permettent d'augmenter le nombre de dimensions et de considérer les interactions entre différents compartiments, puis de mettre en relation modèles chimiques et biologiques.

Labbe Espéret (2002) souligne la dimension systémique du cycle du carbone en rappelant qu'il représente les cycles d'éléments et d'énergie dans des écosystèmes non pas isolés, mais en interaction. Elle précise que cette représentation fait alors cohabiter « cycles biologiques et climatiques, géologiques et pédologiques » (p. 89) dont les régulations reposent sur les principes d'homéostasie et d'équilibre dynamique issus de la physiologie, mais aussi ceux de la thermodynamique, identifiés par Orange et Orange (1995) comme communs à la biologie et à la géologie.

Avec le constat des effets néfastes des activités anthropiques industrielles sur ces régulations, le modèle écologique passe à la main des climatologues qui cherchent alors à élaborer des modèles prédictifs de l'évolution du climat. Heymann et Dahan Dalmedico (2019) identifient ainsi un changement de point de vue sur le cycle du carbone au début des années deux mille avec un recentrement du modèle du compartiment atmosphère, vers la lithosphère. À cela s'ajoute la contribution fondamentale du principe de rétroaction du climat pour l'élaboration de modèles prédictifs.

Le cycle du carbone est donc un objet complexe par nature, qui trouve des origines dans plusieurs disciplines et résulte d'une approche complexe du monde mêlant sciences de la nature et sciences sociales. Par conséquent, le cycle du carbone paraît un bon candidat pour faire du lien entre les disciplines scolaires. Il s'agit à présent de caractériser la nature de ce lien.

#### 4.3.2 Un objet-frontière ?

##### 4.3.2.1 « Ceci n'est pas un objet-frontière »

Le concept d'*objet-frontière* émerge dans le contexte d'une étude ethnographique sur le fonctionnement des travaux de recherche collaboratifs. Star et Griesemer (1989) identifient des *frontières* dans le fonctionnement des activités des acteurs et actrices du Museum de Berkeley, Californie (scientifiques, naturalistes amateurs et amatrices, personnel du Museum, services administratifs, etc.). Celles-ci sont la conséquence de différences socioculturelles qui provoquent des incompréhensions ou malentendus et ainsi, perturbent la continuité de l'action ou des interactions (Akkerman & Bakker, 2011, p. 133). Star et Griesemer (1989) préconisent le développement d'objets-frontières, artefacts qui visent à compenser cette discontinuité et rapprocher les pratiques spécifiques des sujets. Pour être objet-frontière, un artefact doit : 1) être un objet concret ou abstrait, 2) être suffisamment souple pour s'adapter aux contraintes

---

<sup>55</sup> « A comprehensive, global approach in dealing with complex problems » (Heymann & Dahan Dalmedico, 2019, p. 1143, notre traduction).

locales, tout en étant suffisamment robuste pour ne pas se déformer à travers les situations, 3) être faiblement structuré dans son usage global, mais fortement structuré dans son usage local (p. 393).

Star (2010) complète ces définitions dans une publication postérieure. Dans sa recherche de définition de ce que n'est pas un objet-frontière<sup>56</sup>, elle identifie quatre dimensions qui donnent du corps au concept :

- la flexibilité interprétative, soit la liberté de son utilisation et de son interprétation en fonction de la communauté ;
- sa structure organisationnelle ou matérielle permettant aux différents groupes d'acteurs et d'actrices de « travailler ensemble sans consensus préalable » (p. 19) ;
- son échelle et sa granularité, un objet-frontière est pertinent au niveau des organisations (p. 30) ;
- sa portée, toujours spécifique.

Ainsi, Miani (2021) mobilise le concept d'objet-frontière pour étudier le degré d'interdisciplinarité de textes historiques démontrant des théories physiques. Il s'intéresse en particulier à l'articulation des savoirs mathématiques et physiques. Dès lors, un objet-frontière peut être au service de la mise en œuvre de l'interdisciplinarité au sens de Martinand (2008) ; Lenoir et Sauvé (1998), en comblant la frontière séparant les communautés disciplinaires (Figure 38).

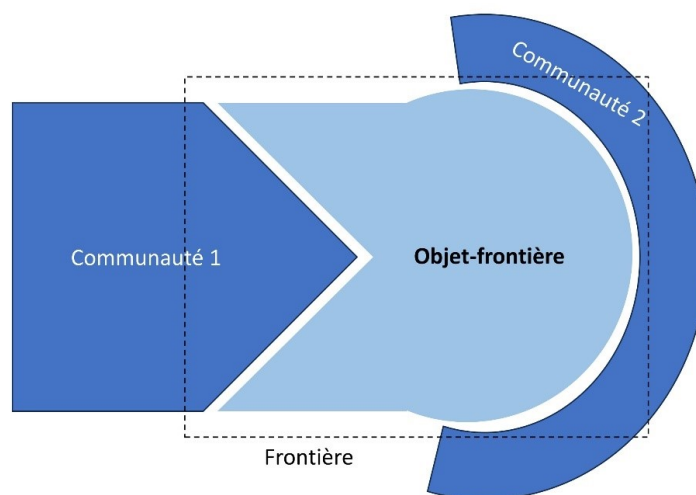


Figure 38 : schéma d'un objet-frontière

Quant à nous, nous l'avons dit précédemment, nous nous plaçons dans le cadre de la codisciplinarité, au sens de Chevallard (2004) pour étudier les situations de collaboration disciplinaires au service de l'étude de problèmes complexes au secondaire (cf. 4.2). L'objet-frontière semble un bon candidat pour mettre en œuvre cette codisciplinarité. Par exemple, la question « Pourquoi la *Piedra Movediza* de Tandil est-elle tombée ? » investiguée par Otero et al. (2016) est un exemple d'objet-frontière codisciplinaire impliquant la physique et les mathématiques. Son étude semble en effet convoquer les quatre dimensions identifiées par Star (2010) : flexibilité interprétative, structure organisationnelle/matérielle générique, échelle globale et portée spécifique.

Aussi, le cycle du carbone, en tant que modèle biogéochimique, pourrait être un potentiel objet-frontière et soutenir la codisciplinarité dans l'enseignement des sciences au secondaire. Cependant, si nous

<sup>56</sup> L'article s'intitule *Ceci n'est pas un objet frontière !* (Star, 2010).

considérons l'usage de cet artefact dans le cadre des cours de chimie, il nous semble que la dimension relative à la structure organisationnelle et matérielle décrite par Star (2010) ne possède pas le caractère générique requis. En effet, comme nous l'avons développé, le cycle du carbone est un concept émergent de la biologie et de la géologie, il s'enracine donc dans des modèles spécifiques de ces disciplines (modèle à compartiments et modèle de rétroaction) qui utilisent des représentations étrangères à la chimie (flux de matière et d'énergie symbolisés par des flèches). Cette remarque nous renvoie aux caractéristiques de l'objet-frontières énoncées par Star et Griesemer (1989), nous nous interrogeons en particulier sur l'équilibre plasticité/robustesse du cycle du carbone : interprétées dans le cadre des modèles de la chimie, les flèches peuvent être associées à des équations de réaction chimique. Dès lors, le principe de flux de matière constitutif du modèle à compartiment (Orange & Orange, 1995) disparaît pour laisser place à des phénomènes de transformations de la matière, soutenus par le principe de conservation des atomes et de la masse. En effet, le cycle du carbone n'a pas de véritable existence dans le cadre de la chimie, ainsi donc la différence de perception des biologistes, géologues et chimistes à sa lecture provient d'une différence de culture disciplinaire. C'est pourquoi, de notre point de vue, le cycle du carbone ne pourrait combler qu'une partie de la frontière entre biologie, géologie et chimie, d'autant plus qu'il s'agit d'un artefact élaboré d'un côté de la frontière.

#### 4.3.3 Le concept d'objet-relais : vers une matrice problématique

Nous tentons alors de définir un nouveau concept pour désigner ce type d'objet, complexe par nature, qui permet de faire du lien à la fois entre les disciplines scolaires, mais aussi entre l'enseignement de savoirs scientifiques et la formation des citoyens et citoyennes. Nous nommons un tel objet « objet-relais », en utilisant le terme « relais » dans son sens physique<sup>57</sup> afin de signifier son rôle dans la connexion des deux communautés, à travers notamment la mise en relation des matrices disciplinaires (Figure 39).

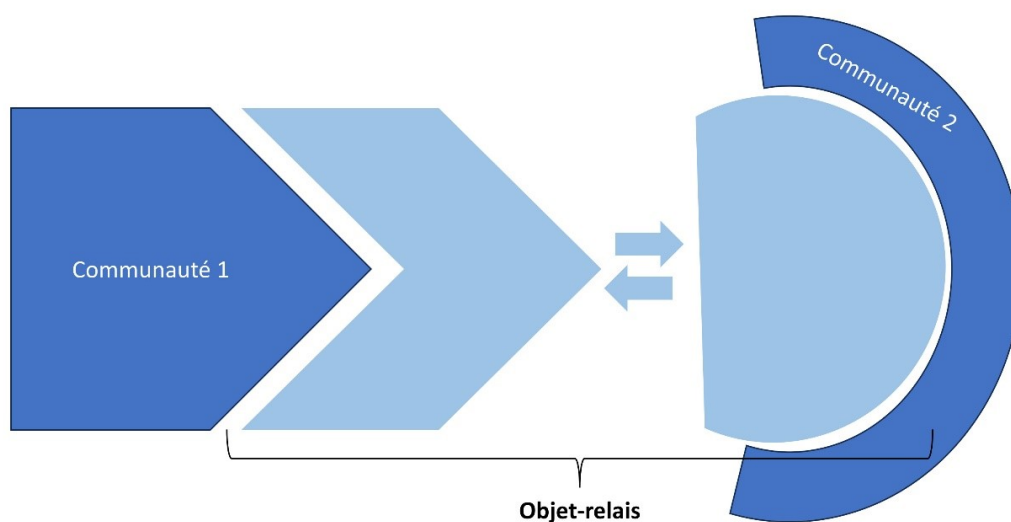


Figure 39 : schématisation d'un objet-relais faisant le lien entre deux communautés disciplinaires

<sup>57</sup> « [À propos de mécanismes] 1. ÉLECTR. Système électro-magnétique d'ouverture et de fermeture d'un circuit électrique"(Clém. Alim. 1978). Relais électromagnétique. 2. MÉCAN. Dispositif assurant la transmission ou la transformation d'un mouvement"(Boissier 1975). 3. RADIO-TÉLÉV. Relais hertzien. Station retransmettant vers un récepteur suivant un faisceau d'ondes électro-magnétiques émis par un émetteur principal (d'apr. Neyron 1970). » (« Relais », s. d.).

La double flèche au centre du schéma ci-dessus représente les transformations possibles de l'objet-relais, objet protéiforme et changeant selon les besoins de la communauté.

Dans une démarche d'ancrage du concept d'objet-relais dans les théories existantes, nous rappelons que nous considérons le cycle du carbone comme un bon candidat pour aborder le problème du réchauffement climatique en classe de chimie au secondaire, problème complexe flou au sens de Fabre (2021). Aussi, cet auteur identifie les *matrices problématiques* comme l'un des outils permettant de répondre à de tels problèmes. Une matrice problématique correspond à une représentation du problème, une sorte de carte qui répertorie tous les domaines concernés. Ceux-ci sont reliés par des flèches qui symbolisent les processus qui les connectent. À ces flèches s'ajoutent des boucles de rétroaction qui permettent de réguler l'intensité des processus à l'œuvre (p. 96). Une telle description pourrait sans aucun doute désigner un cycle du carbone tenant compte des activités humaines industrielles. Il semble donc que notre objet-relais pose les bases d'une matrice problématique au service de la compréhension de l'anthropocène.

Cependant, dans l'enseignement secondaire français et suisse-romand, les disciplines s'organisent selon des territoires strictement délimités. Il s'agit à présent d'investiguer dans quel(s) contexte(s) disciplinaire(s) cet objet complexe est enseigné au début du secondaire afin de déterminer son degré potentiel de codisciplinarité.

#### 4.3.4 Le potentiel codisciplinaire du cycle du carbone

##### 4.3.4.1 *Ce que le cycle du carbone permet d'apprendre au secondaire I*

###### 4.3.4.1.1 *Regard sur le savoir à enseigner*

Dans le contexte suisse-romand, le cycle du carbone est au programme de cycle 3 des domaines « Mathématiques et Sciences de la Nature » (MSN) et « Sciences humaines et sociales » (SHS). Nous le retrouvons dans les Moyens d'enseignement romands (MER) MSN 38 (sciences de la nature) et SHS 31 (géographie). En effet, en Suisse romande, les savoirs de géologie sont programmés dans la discipline scolaire « géographie ».

Dans le cadre des enseignements de biologie, le cycle du carbone est mis en lien avec le phénomène de photosynthèse afin de percevoir « la complexité des équilibres et la nécessité de préservation de la biodiversité » (CIIP, 2010f, p. 53). Dans le cadre des enseignements de géographie, le PER ne cite pas directement le cycle du carbone, mais ses représentations dans les MER visent une « explicitation des enjeux et des conséquences du changement climatique » (CIIP, 2010g).

Dans le contexte français, nous retrouvons des représentations du cycle du carbone dans les manuels scolaires de SVT<sup>58</sup> de cycle 4. Bien que le concept ne soit pas explicitement cité par le programme de SVT à ce niveau, nous voyons dans le cycle du carbone le potentiel pour illustrer les compétences suivantes : « Caractériser quelques-uns des principaux enjeux de l'exploitation d'une ressource naturelle par l'être humain, en lien avec quelques grandes questions de société. » et « Expliquer comment une activité humaine peut modifier l'organisation et le fonctionnement des écosystèmes en lien avec quelques questions environnementales globales. » (Ministère de l'Éducation nationale, de la jeunesse et des sports, 2018, p. 124). Contrairement au PER, le programme de SVT de cycle 4 ne fait pas de lien

---

<sup>58</sup> Dans le secondaire en France, les savoirs de biologie et de géologie sont enseignés ensemble, dans la discipline « sciences de la vie et de la Terre » (SVT) (cf. 3.1.2.3.1).

explicité entre ces savoirs enseignés dans le cadre de la biologie et les autres disciplines scientifiques scolaires. Pourtant, les compétences attendues en fin de cycle 4 semblent relever de la compréhension de problèmes complexes.

#### 4.3.4.1.2 *Analyse épistémologique*

En effet, le cycle du carbone permet de penser la relation que l'être humain entretient à son environnement, car il représente les « transferts de carbone » entre atmosphère, hydrosphère, lithosphère et biosphère. Certains de ces transferts sont d'origine végétale (la photosynthèse), animale (la respiration) ou géologique (la formation des hydrocarbures), d'autres ont pour origine les activités anthropiques d'une partie de la population mondiale : les pays industrialisés. Le rôle des activités humaines industrielles dans le déséquilibre du cycle du carbone est mis en évidence par la production de grandes quantités de dioxyde de carbone — gaz « à effet de serre » — dans le compartiment « atmosphère ». Ainsi, la photosynthèse et l'absorption des océans ne peuvent plus compenser les quantités de dioxyde de carbone produites dans l'atmosphère. Le carbone, stocké sous la forme de gaz à effet de serre, présente alors un danger pour le climat, et donc pour les écosystèmes qui en dépendent. Il s'agit ensuite d'expliciter le rôle du dioxyde de carbone dans l'augmentation du phénomène d'effet de serre, concept qui demande un enseignement spécifique (Maron et al., 2022), pour finir de construire le lien entre production anthropique de dioxyde de carbone et réchauffement climatique.

De plus, le cycle du carbone repose sur le principe de conservation de la matière. En effet, les « transferts » ou « flux » de carbone représentés par des flèches sont modélisés en chimie comme des transformations chimiques. Ainsi, la transformation des substances carbonées entre deux compartiments permet la conservation de l'élément sur l'ensemble du cycle. Les transformations chimiques font le lien entre le vivant et le non-vivant, la transformation du carbone organique en carbone inorganique et inversement.

Dès lors, le modèle de la réaction chimique permet de mettre en évidence les quantités excessives de dioxyde de carbone produites dans l'atmosphère dans une durée de temps incompatible avec le rythme des cycles biologiques et géologiques. Pourtant, le carbone est le premier incriminé dans le langage courant et dans les médias à travers les injonctions à « décarboner » nos modes de vie et à évaluer « notre bilan carbone ». Ces expressions ont peu de sens en chimie, mais font référence à l'un des multiples modes d'existence du carbone (Bensaude-Vincent & Loeve, 2018). En effet, du point de vue du savoir de référence, le mot « carbone » désigne principalement l'élément carbone, modèle abstrait qui permet d'expliquer les transformations de la matière, mais qui par définition n'a pas de réalité matérielle. De plus, il n'existe pas dans la nature de corps simple « carbone », les substances majoritairement composées d'élément carbone sont, par exemple, le charbon, le graphite ou le diamant, mais ne sont pas des corps purs. Du côté des corps composés, l'élément carbone entre dans la composition d'un grand nombre de substances indispensables à la vie. Ainsi, les métonymies que nous venons de citer reposent en fait sur le principe du dioxyde de carbone comme mesure étalon de l'ensemble des gaz à effet de serre. Selon Bensaude-Vincent et Loeve (2018), cette conceptualisation du carbone qui se retrouve jusque dans le langage courant, serait soutenue par la conception de la maîtrise du feu comme « péché originel » (paragr. 1) commis par l'espèce humaine, source de toutes les néfastes combustions. De notre point de vue, il semble que l'image d'un excès de carbone stocké dans l'atmosphère — ainsi que la dimension péjorative qui lui est associée — réduit l'élément carbone à la composition du dioxyde de

carbone en occultant toutes les autres. Cela n'est certainement pas sans conséquence pour la compréhension des réactions en jeu dans le cycle du carbone.

Aussi, des études se centrant spécifiquement sur le changement climatique (McNeill & Vaughn, 2012; Shepardson et al., 2012) et l'effet de serre (Jakobsson et al., 2009) montrent que l'origine du dioxyde de carbone atmosphérique est le plus souvent inexplicée par les élèves. Ainsi, la relation entre production de dioxyde de carbone et réchauffement climatique n'est que rarement citée. Si nous devons considérer avec précautions ces résultats issus de recherches menées il y a plus de dix ans, notre étude des curricula français et suisse-romands identifie des discontinuités dans l'enseignement des modèles impliqués dans le cycle du carbone. Cette discontinuité pourrait induire des obstacles à la compréhension de questions plus globales telles que le réchauffement climatique.

#### 4.3.4.1.3 Discontinuité des apprentissages et difficultés des élèves

Du point de vue de la progressivité, le cycle du carbone est prévu par le PER pour être enseigné en 10<sup>e</sup> année (élèves de 13-14 ans). Les textes officiels du MSN 38 indiquent que photosynthèse et cycle du carbone doivent être mis en relation avec la thématique « Phénomènes naturels et techniques » (MSN 36), thématique regroupant des savoirs de physique et de chimie. Nous interprétons cette recommandation comme la demande de mise en relation avec le modèle de la transformation chimique, les autres savoirs dispensés dans le cadre du MSN 36 relevant plutôt de la physique et n'ayant donc que peu de liens avec ces savoirs abordés en biologie. Or, les transformations chimiques sont enseignées en 11<sup>e</sup> année selon le PER. Nous observons alors une discontinuité dans la programmation des savoirs au cycle 3. Discontinuité qui s'avère problématique pour réaliser certains exercices des MER de biologie (Figure 40), où il est demandé aux élèves de rédiger une équation de réaction chimique à partir de la modélisation atomique de la photosynthèse, alors même que le concept d'atome et leur principe de conservation n'ont pas été introduits dans le cadre du cours de chimie.

### 3. Autres modèles

La **photosynthèse** est un ensemble de réactions chimiques qui peut se modéliser de différentes façons :

**Equation-bilan**

EAU + DIOXYDE DE CARBONE → GLUCOSE + DIOXYGÈNE

**Modèle moléculaire**

● oxygène ○ hydrogène ● carbone

**Equation**

1. Ecris l'équation chimique représentant la photosynthèse :

..... + ..... → ..... + .....

Figure 40 : exemple d'exercice des MER MSN 38 (CIIP, 2010e)

Dans le contexte français, le programme de SVT de cycle 4 indique que la thématique « Ressources naturelles, écosystèmes, activités humaines » dont nous avons cité deux compétences ci-dessus, peut être abordée à tous les niveaux du cycle, soit de la 5<sup>e</sup> à la 3<sup>e</sup> (élèves de 12 à 15 ans, pour une comparaison des systèmes scolaires français et suisse-romand voir annexe 2). Les représentations du cycle du carbone repérées à l'issue de notre étude curriculaire (Sudriès et al., 2023) sont prévues pour les classes de 3<sup>e</sup> (élèves de 14-15 ans). Cependant, les enseignantes de SVT avec lesquelles nous travaillons (cf. Chapitre 9) nous indiquent introduire le cycle du carbone et l'équation de réaction de la photosynthèse avec leurs classes de 5<sup>e</sup> (élèves de 12-13 ans). Nous rappelons qu'en France, les transformations chimiques sont présentées dans le cadre de la discipline physique-chimie au niveau du modèle macroscopique en classe de 5<sup>e</sup> (élèves de 12-13 ans), puis au niveau du modèle microscopique en classe de 4<sup>e</sup> (élèves de 13-14 ans). Il semblerait que la discontinuité constatée dans les curricula suisse-romands soit également présente dans l'enseignement du cycle du carbone en France.

Pourtant, les travaux de Schramm et al. (2018) ; Düsing et al. (2019) relèvent la nécessité du modèle de la réaction chimique pour comprendre les transformations de la matière en jeu dans le cycle du carbone. Les résultats de l'étude menée par Schramm et al. (2018) sur des élèves du secondaire montrent la pertinence des modèles atomiques matériels (billes et tiges) pour les soutenir dans l'explication des phénomènes biologiques tels que la photosynthèse et la respiration. De même que les élèves qui maîtrisent préalablement le modèle de la réaction chimique au niveau macroscopique réussissent particulièrement cet exercice d'explication des phénomènes biologiques. L'étude met en évidence l'importance de la représentation microscopique des transformations de la matière — y compris par des modèles matériels — pour comprendre ces transformations à une échelle plus globale, au niveau du cycle du carbone. La revue de littérature menée par Düsing et al. (2019) va dans le sens de ces résultats.

Notons que nous retrouvons ici la rupture épistémologique vis-à-vis du modèle de savoir en chimie décrite dans le chapitre 2. En effet, les phénomènes biologiques et géologiques sont directement interprétés au niveau du modèle microscopique, sans l'intermédiaire du modèle macroscopique. Comme nous le présentions dans le chapitre 2 (cf. 2.3.1), cette épistémologie particulière des savoirs en chimie trouve un écho dans la façon dont les phénomènes sont modélisés en biologie/géologie.

Enfin, selon Roßbegalle et Ralle (2016), la modélisation moléculaire de l'atmosphère joue également un rôle dans la compréhension du phénomène d'effet de serre. En effet, le phénomène est souvent interprété par les élèves comme une conséquence du trou dans la couche d'ozone. Elles et ils font alors un lien direct entre « failles » dans la barrière que constitue la couche d'ozone et baisse de protection contre les rayons du soleil, qui peuvent traverser directement l'atmosphère jusqu'à la lithosphère. Cependant, le phénomène d'effet de serre est la résultante de l'absorption par les gaz de l'atmosphère — le dioxyde de carbone en particulier, mais aussi le méthane et le protoxyde d'azote — des rayons infrarouges émis par la Terre. La thèse en physique de Larcher (2016) nous indique que « ces propriétés d'absorption sont dues à la structure interne des molécules permettant d'absorber des photons dont l'énergie correspond à l'écart entre deux niveaux d'énergie de la molécule concernée » (p. 25). Les travaux de cette autrice nous indiquent que les propriétés d'absorption des rayons infrarouges des GES sont donc modélisées à l'échelle microscopique par une interaction molécules-photons. Cette explication mobilise plusieurs savoirs disciplinaires : le modèle de la matière de Bohr, la dualité onde-corpuscule de la lumière et les interactions rayonnement-matière.

La mise en perspective de l'étude des curricula français et suisse-romand à propos du cycle du carbone, et d'une analyse épistémologique des savoirs impliqués dans cet objet complexe nous permettent de construire le réseau des concepts scientifiques nécessaires à la compréhension de l'origine anthropique du réchauffement climatique (Figure 41).

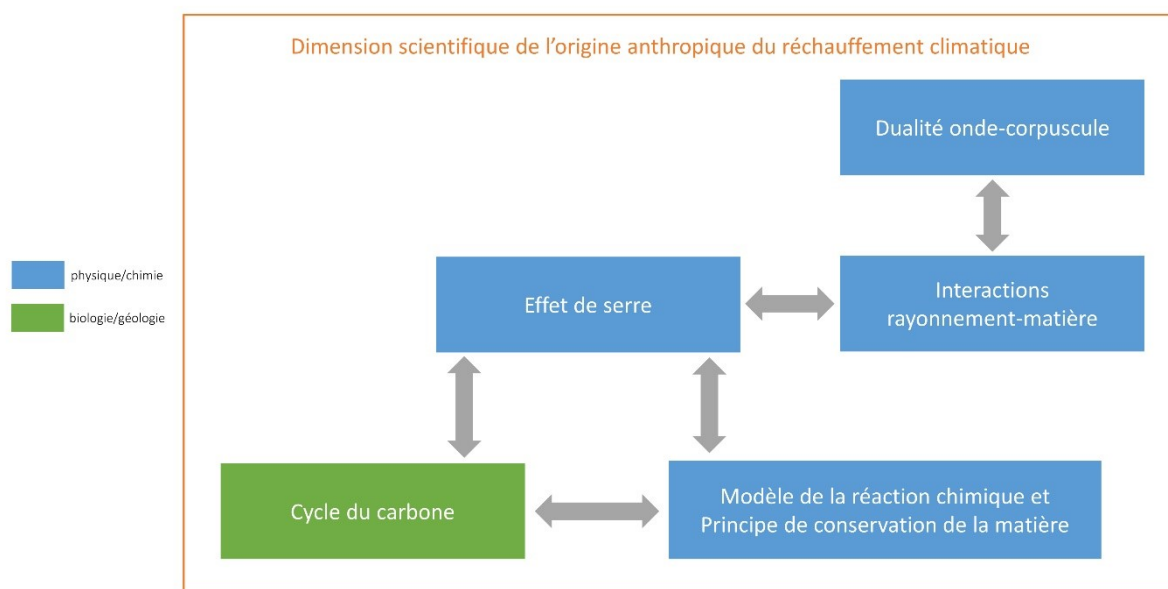


Figure 41 : relation entre les concepts scientifiques contribuant à comprendre l'origine anthropique du réchauffement climatique

Si nous reprenons la métaphore du tissage de Morin (1982) présentée en introduction (cf. 1.2.1), cette représentation nous donne une première idée de l'entremêlement des disciplines scientifiques, dans l'élaboration du problème complexe à l'étude. Ce réseau conceptuel correspond à une des dimensions nécessaires pour comprendre le réchauffement climatique : la dimension scientifique. Celle-ci doit être mise en relation avec les dimensions économique, politique, historique, philosophique et éthique qui contribuent également à la complexité de la question.

La mise en relation des modèles des différentes disciplines scolaires — chimie, biologie, géologie et physique — semble indispensable à la compréhension des phénomènes en jeu dans le cycle du carbone. Les études sur les conceptions des élèves tendent à montrer que cette mise en relation est loin d'être évidente, y compris à la fin du secondaire (Düsing et al., 2019; Marmaroti & Galanopoulou, 2006; Mohan et al., 2009; Zangori et al., 2017) et dans l'enseignement supérieur.

Pour répondre à ces difficultés, deux études américaines cherchent à enseigner ces différents modèles disciplinaires de façon conjointe en appui sur le cycle du carbone, dans l'objectif d'aborder l'anthropocène en classe de sciences. Ces études pourraient apporter des éléments à la définition du cycle du carbone en tant qu'objet codisciplinaire.

#### 4.3.5 Le cycle du carbone pour aborder l'origine anthropique du changement climatique

Dans leur étude sur la construction de progressions d'apprentissages intégrant différentes disciplines scientifiques, Mohan et al. (2009) mettent en avant le rôle de modèles disciplinaires tel que la réaction chimique, pour penser la complexité du cycle du carbone.

Dans l'objectif de faire entrer les élèves dans l'approche complexe nécessaire à la compréhension de l'origine anthropique du changement climatique, cette étude propose un cycle du carbone où les activités

socio-économiques propres aux humains sont distinguées des phénomènes biogéochimiques. Dans cette représentation du cycle du carbone de conception naturaliste, l'espèce humaine en tant qu'organisation sociale et économique constitue un compartiment, atmosphère et biosphère en formant un second. Ces deux compartiments sont mis en relation par des flèches symbolisant des réactions de combustions (Figure 42). Nous voyons dans cette représentation, qui confronte les phénomènes biologiques, géologiques et chimiques propres aux écosystèmes et les enjeux des sociétés humaines constituées par des sujets à la fois citoyens, travailleurs, consommateurs et apprenants, l'émergence d'une matrice problématique (Fabre, 2021) dont nous discutons précédemment (cf. 4.3.3).

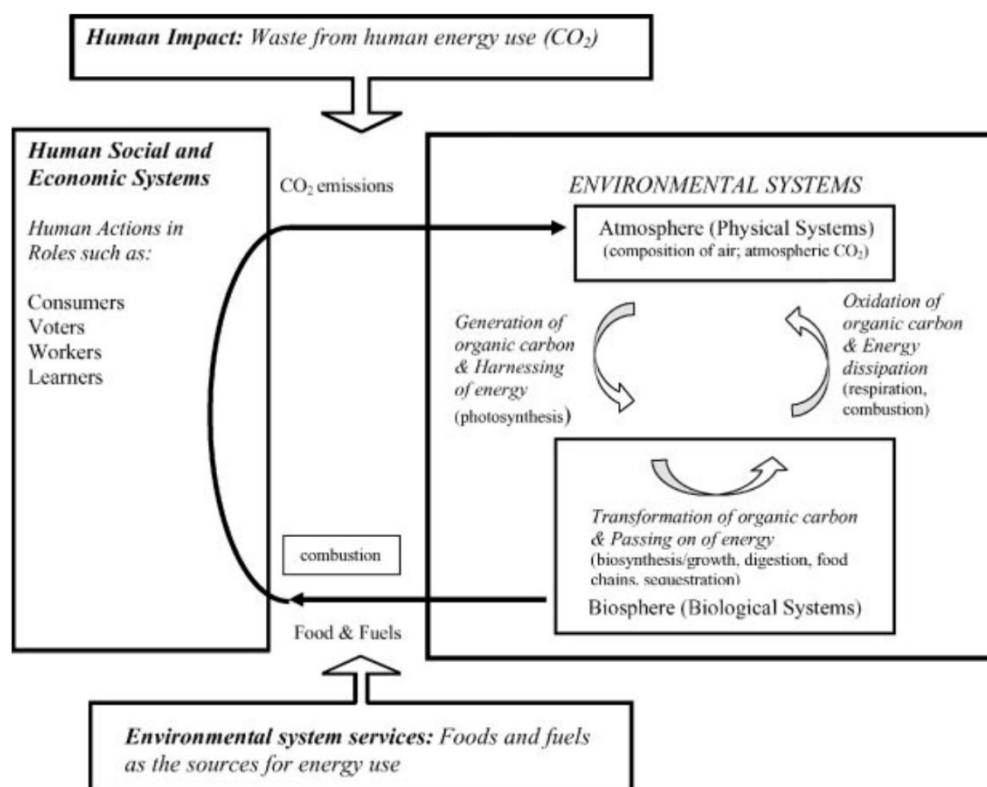


Figure 42 : cycle du carbone d'après Mohan et al. (2009, p. 677)

Sur la base de cette analyse épistémologique du savoir de référence, Mohan et al. (2009) cherchent à identifier différents niveaux de modélisation du cycle du carbone dans les explications fournies par des élèves de 9 à 18 ans<sup>59</sup> à propos de situations de transformation de la matière. Au niveau local, il leur est demandé d'expliquer pourquoi les arbres et les animaux grandissent, mais aussi, les phénomènes de digestion, de décomposition et de combustion. À un niveau plus global, les élèves doivent expliquer un exemple de chaîne alimentaire ainsi que le rôle de la déforestation et de la combustion du pétrole dans le changement climatique (p. 682). L'analyse des réponses s'intéresse particulièrement à l'utilisation par les élèves du modèle de la réaction chimique et du principe de conservation de l'élément carbone. Quatre paliers dans le processus d'apprentissage du cycle du carbone sont alors identifiés :

- palier 1, les élèves décrivent les phénomènes en termes d'objets et d'évènements sans évoquer d'interprétation scientifique ;

<sup>59</sup>L'étude concerne des classes américaines de 4<sup>th</sup> à 12<sup>th</sup> grades (de la 6 P-H à la fin du cycle post-obligatoire dans le système scolaire suisse-romand, du CM1 à la Terminale dans le système scolaire français).

- palier 2, les élèves interprètent les phénomènes macroscopiques en termes de « mécanismes invisibles » (p. 686), à ce niveau, les modèles et principes de chimie qui permettent d’interpréter ces mécanismes ne sont pas mobilisés ;
- palier 3, les élèves sont capables d’utiliser certains concepts de chimie pour interpréter les transformations de la matière qui ont lieu dans le cycle du carbone, elles et ils identifient en particulier la conservation de l’élément carbone au cours de ces différentes transformations ;
- palier 4, les élèves sont parfaitement capables d’interpréter les différentes transformations chimiques en jeu dans le cycle du carbone, elles et ils mobilisent des modèles et principes spécifiques tels que le principe de conservation de la masse.

Le palier 1 concerne les explications fournies par les élèves de primaire. Le palier 2 correspond à une majorité de réponses d’élèves du secondaire I (11-14 ans) alors que le palier 3 concerne plutôt les élèves de secondaire II<sup>60</sup>. Enfin, 10 % des élèves de secondaire II fournissent des réponses correspondant au palier 4. Ces résultats devraient être mis en relation avec les curricula de sciences des contextes étudiés (États-Unis et une école américaine de Corée du Sud). En effet, la transition du palier 2 au palier 3 pourrait correspondre à l’enseignement du modèle de la réaction chimique, en supposant qu’il intervienne à la fin du secondaire I, comme dans les contextes francophones que nous étudions. Or, les résultats de cette étude ne rendent pas compte des enseignements de sciences dispensés aux différents niveaux étudiés.

Dans la perspective de reconnecter enseignement de la chimie et formation citoyenne<sup>61</sup>, Mohan et al. (2009) proposent d’envisager les quatre paliers identifiés par leur étude comme autant d’étapes d’enseignement du cycle du carbone. L’objectif étant de viser le palier 4, où la complexité de l’anthropocène est expliquée à la lumière des savoirs de chimie.

L’étude de Zangori et al. (2017) poursuit le même objectif de conciliation des enseignements scientifiques avec la formation citoyenne. Selon cette étude, les savoirs scientifiques sont indispensables pour comprendre les enjeux environnementaux actuels tels que le changement climatique, mais doivent être mis en relation avec les dimensions politique, sociale et économique qu’ils impliquent. Dans l’objectif d’entrer dans la complexité<sup>62</sup> dans le cadre du cours de biologie, leur étude propose à des élèves de 15-16 ans (10<sup>th</sup> grade)<sup>63</sup> d’élaborer des représentations du cycle du carbone pour comprendre le changement climatique. L’approche proposée insiste particulièrement sur la mise en relation des échelles locale — transferts de carbone au niveau d’une prairie voisine de l’établissement scolaire — et globale — réchauffement climatique planétaire — grâce à des allers-retours explicites entre les modèles concernés. Pour cela, les élèves doivent identifier des liens de causalité entre les différentes composantes du cycle du carbone — appelés « séquences » — dans leurs dimensions scientifiques, mais aussi

---

<sup>60</sup> *High school* aux États-Unis, collège dans le canton de Genève, lycée en France.

<sup>61</sup> « Science literacy » (Mohan et al., 2009, notre traduction), nous choisissons cette traduction pour insister sur la dimension « éducation » qu’elle porte.

<sup>62</sup> Il est question dans l’article d’une « Socio-Scientific teaching and Learning Approach » (p. 1252). Nous choisissons de ne pas reprendre le terme de « question socialement vive » dans le sens des recherches francophones, car le développement de la méthodologie rend compte de l’étude d’un problème complexe (le réchauffement climatique), loin des critiques formulées à l’encontre des EA, dont les QSV font partie (Fabre, 2014). De plus, nous avons discuté le statut non controversé du changement climatique de nos jours, à la lumière des derniers rapports du GIEC (2014, 2021) (cf. 4.1.3).

<sup>63</sup> Début du cycle post-obligatoire dans le système scolaire suisse-romand, classe de seconde en France (cf. annexe 2 pour une comparaison des systèmes scolaires).

économiques et politiques. Il s'agit ensuite d'interpréter ces séquences en mobilisant les savoirs disciplinaires idoines.

Nous voyons dans l'approche de Zangori et al. (2017) l'ébauche d'une matrice problématique, soutenue par le cycle du carbone, au service de la résolution d'un problème super-pernicieux, au sens de Fabre (2021). Cette approche repose sur l'hypothèse selon laquelle l'étude du changement climatique favorise la modélisation des « transferts » de carbone au sein du cycle et réciproquement.

Leurs résultats vont dans le sens de cette hypothèse et montrent un perfectionnement de la modélisation des différents transferts de carbone du cycle au cours de leur expérimentation. À la fin de la séquence, les résultats montrent que les élèves mobilisent des savoirs spécifiques tels que la transformation chimique pour interpréter le changement climatique à l'aide du cycle du carbone, mais que le modèle qui sous-tend la transformation chimique — la modification des molécules et la conservation des atomes — reste encore confus. Parmi ces modèles, la conservation de l'élément carbone leur semble essentielle pour comprendre l'interdépendance des processus représentés dans le cycle du carbone et donc les causes de son déséquilibre. Les résultats montrent aussi que les élèves qui maîtrisent le concept de combustion du carbone parviennent à expliquer comment l'élément carbone peut se trouver en excès dans l'atmosphère, première étape pour comprendre le réchauffement climatique (cf. 4.3.4.1).

Ces deux études montrent les multiples potentiels du cycle du carbone. Potentiel codisciplinaire d'une part pour enseigner des modèles traditionnellement séparés par la logique des disciplines scolaires (par exemple réaction chimique et photosynthèse). Potentiel pour entrer dans une pensée complexe d'autre part, soutenu par la codisciplinarité. Le cycle du carbone est particulièrement pertinent pour penser la relation que l'être humain entretient à son environnement et rendre compte d'une des conséquences des activités anthropiques : le réchauffement climatique. Bien que les études de Mohan et al. (2009) ; Zangori et al. (2017) développent des approches du cycle du carbone au service de la compréhension du changement climatique, nous choisissons de nous concentrer sur une composante de ce problème super-pernicieux : le réchauffement du climat. En effet, la dimension scientifique de la matrice problématique élaborée sur la base d'une analyse épistémologique des savoirs scientifiques (Figure 41) montre la complexité intrinsèque à cette unique dimension. Dans la perspective d'intégrer un problème complexe à l'enseignement de la chimie au secondaire I en France et en Suisse romande, il nous semble plus raisonnable de nous limiter au problème du réchauffement climatique, que nous qualifions de « complexe flou » (cf. 4.1.5). D'autant plus que les savoirs des curricula de chimie de ce niveau contribuent à la matrice problématique permettant de répondre à ce problème. De notre point de vue, comprendre le réchauffement climatique à travers une étude codisciplinaire du cycle du carbone peut constituer un préalable à l'étude du changement climatique dans son ensemble.

#### 4.4 Conclusion du chapitre

Après avoir présenté la multitude de définitions de l'interdisciplinarité et les limites de chacune d'elles, nous nous sommes positionnée en faveur d'une approche plus concrète, centrée sur les savoirs dispensés en classe, pour étudier la collaboration des disciplines scolaires : la codisciplinarité au sens de Chevallard (2004). Cette approche permet de comprendre l'étude de la complexité en situation d'enseignement-apprentissage, à travers une analyse de la transposition didactique.

Vis-à-vis de la question qui nous anime, la contribution des enseignements de chimie du secondaire I à la compréhension de l'origine anthropique du réchauffement climatique, le cycle du carbone semble un candidat sérieux pour la mise en œuvre d'une telle codisciplinarité en classe de chimie.

L'analyse épistémologique de cet objet complexe nous permet de le qualifier d'objet-relais, structure initiatrice de la matrice problématique (Fabre, 2021) répondant au problème du réchauffement climatique. Cette analyse permet également de préciser les limites de notre travail qui place la focale sur la dimension scientifique du problème complexe mis à l'étude.

Ce type d'étude a déjà été mené dans le cadre des enseignements de physique au secondaire. Par exemple, Hervé et al. (2013) questionnent l'articulation de savoirs controversés (le changement climatique) et stabilisés (l'énergie) en classe de physique de première scientifique (secondaire II, France). L'étude de deux séances, l'une portant sur l'énergie, l'autre sur le climat, montre que la première est le lieu d'élaboration de savoirs disciplinaires (concepts, usage du vocabulaire spécifique, épistémologie sous-jacente) qui sont investis dans la seconde pour étudier un phénomène naturel : le climat (p. 9). Cette étude sert ensuite d'outil pour traiter une controverse<sup>64</sup> : la dimension anthropique du réchauffement climatique. Les résultats montrent que l'étude du réchauffement climatique ne peut se faire sans la prise en compte des savoirs de physique qui doivent faire l'objet d'un enseignement particulier. Ceux-ci, une fois acquis, sont mobilisables pour l'étude de situations complexes impliquant des savoirs en biologie et géologie notamment, mais aussi, géographie, politique, histoire, philosophie et éthique.

Aussi, soucieuse de ne pas occulter les autres dimensions contribuant à la complexité du réchauffement climatique, nous montrons dans ce chapitre quelques-unes des dimensions écologique, historique et philosophique qui entrent en jeu dans la représentation du cycle du carbone.

Du point de vue de l'ensemble de notre travail, ce chapitre se place à l'articulation de deux approches : didactique de la chimie et didactique comparée. En effet, nous proposons ici une transition entre l'analyse des savoirs disciplinaires dans leur dimension spécifique, développée dans les chapitres 2 et 3, et les outils génériques nécessaires pour l'étude des situations d'enseignement-apprentissage (chapitre 5) dont nous montrons la nécessité dans le présent chapitre. La didactique comparée propose des outils particulièrement pertinents pour naviguer entre les différentes matrices disciplinaires inhérentes au traitement de la complexité. Il s'agit dans le chapitre 5 de présenter ces outils, notamment à travers la définition de concepts restés latents jusqu'alors, et pourtant fondateurs de la didactique, à commencer par la transposition didactique.

---

<sup>64</sup> Nous reprenons ici l'expression rencontrée dans ce travail, telle que développée dans la thèse de Hervé (2012), sans nous associer à la vision controversée du réchauffement climatique (cf. 4.1.3).

## CHAPITRE 5 — LES OUTILS CONCEPTUELS DE LA DIDACTIQUE COMPARÉE

*Par souci de clarté, nous utilisons dans certains paragraphes de ce chapitre théorique les noms masculins « professeur » et « acteurs », noms employés dans les formulations des théories que nous rapportons ici, pour désigner les individus enseignants et apprenants. Bien entendu, ces individus peuvent être des personnes de genres féminin, masculin ou autres. Dans les autres paragraphes, nous utilisons l'écriture inclusive<sup>65</sup>, comme dans l'ensemble de la thèse, soucieuse de mobiliser une langue française plus représentative de notre société (Académie française, 2019; Candea & Véron, 2019; Lenoble-Pinson, 2008).*

Ce chapitre présente une partie des éléments théoriques nécessaires à la construction de notre problématique, en particulier le modèle de l'action didactique conjointe développé dans le cadre des recherches comparatistes en didactique. Après avoir présenté les enjeux théoriques et méthodologiques de la didactique comparée dans la partie 1, nous consacrons la partie 2 aux concepts chevallardiens de système didactique et de transposition sur lesquels le modèle de l'action didactique conjointe s'appuie. Dans la partie 3, nous présentons les concepts de contrat didactique et de milieu tels que pensés par Brousseau (1990, 1998) dans le cadre de la Théorie des situations didactiques, concepts revisités par le modèle de l'action didactique conjointe. Les définitions de milieu et de rapport aux objets au sens de Chevallard, contribuant à cette revisite, sont présentées dans la partie 4. Enfin, la partie 5 rend compte des héritages et des évolutions des concepts fondamentaux de la didactique (transposition didactique, contrat didactique, milieu) dans la structuration du modèle de l'action didactique conjointe, ainsi que l'ensemble des descripteurs et des déterminants qui permettent l'étude des situations d'enseignement-apprentissage en classe.

### 5.1 Comparatisme en didactique : distinguer le générique du spécifique

Les recherches en didactique comparée émergent au début des années deux mille, en suivant les perspectives actionnelles qui se développent dans le domaine des Sciences Humaines et Sociales (SHS). Ainsi, il ne s'agit plus de considérer que les actions observables dans les processus d'enseignement-apprentissage sont la conséquence des connaissances/conceptions des individus, mais d'étudier comment celles-ci sont mobilisées en situation (Amade-Escot, 2019). Lorsque la didactique comparée apparaît, les champs des didactiques disciplinaires occupent le domaine depuis une trentaine d'années. Ces derniers se structurent selon l'idée que les processus d'enseignement-apprentissage sont spécifiques des savoirs concernés. Le champ de la didactique comparée à la fois repose sur les, et contribue aux, didactiques disciplinaires, notamment parce qu'il participe à justifier leurs provincialités (Ligozat, 2016; Mercier et al., 2002; Schubauer-Leoni & Leutenegger, 2003). Dans un texte fondateur du champ de la didactique comparée, Mercier et al. (2002) décrivent « deux grands niveaux de questionnements comparatistes » (p.8).

Le premier niveau s'intéresse aux institutions de transmission de savoir et aux contraintes qu'elles peuvent exercer sur la constitution de ce savoir ; notamment la structure des disciplines (académiques et

---

<sup>65</sup> Pour cela, nous suivons les recommandations des linguistes d'*Antidote* (Antidote, 2020), logiciel utilisé pour la vérification orthographique et grammaticale de la thèse (Druide informatique, 2021).

scolaires) et les moments charnières entre ces différentes institutions (Ligozat, 2016). De telles études s'intéressent à la dimension spécifique des institutions didactiques, à la lumière du comparatisme. De plus, ce premier niveau de questionnement s'intéresse aux organisations sociales de transmission de savoir au-delà des institutions officiellement désignées pour ce rôle, ce que Mercier et al. (2002) nomment « l'ailleurs du didactique » (p. 8). Ces études contribuent alors à la définition de « la didactique » comme domaine d'étude « du didactique ». Chevallard (1992) distingue en effet *le didactique* en tant qu'un domaine de la réalité relatif à ce qui s'enseigne et ce qui s'apprend, *des didactiques*, comme domaines d'études — ou sciences — spécifiques d'objets de savoirs appartenant à certaines portions de cette réalité.

Le deuxième niveau de questionnement s'intéresse aux concepts développés dans le cadre des didactiques. Les pratiques alors étudiées se situent dans les champs délimités par les études du premier niveau.

Par la mise en perspective de ces différents systèmes théoriques et méthodologiques, la didactique comparée fait émerger des dimensions épistémologiques, notamment à propos des liens que les didactiques entretiennent avec leurs disciplines de référence ou entre la didactique en tant que science des conditions d'enseignement-apprentissage de certains objets de savoirs, et les autres SHS. Selon Mercier et al. (2002), ces deux niveaux de questionnement permettent de distinguer « *caractère générique* et *caractère spécifique*<sup>66</sup> des phénomènes didactiques ». En effet :

Cette distinction semble décisive d'une part, pour permettre d'éclairer la fonction des divers objets d'enseignement/apprentissage dans le fonctionnement d'un système didactique et d'interroger la nature et la définition même des savoirs ; d'autre part, elle donne un outil puissant pour caractériser l'action conjointe du professeur et des élèves (Sensevy et al, 2000 ; Sensevy, 2001a, 2001b et 2002 ; Mercier, 2002 ; Leutenegger & Schubauer-Leoni, à paraître ; Schubauer-Leoni et al, en préparation) en produisant des éléments de réponse à la question suivante (et la question elle-même) : dans le travail du professeur et dans celui des élèves, qu'est-ce qui est générique et peut être rapporté à un processus d'enseignement (ou d'apprentissage), qu'est-ce qui est spécifique et doit être rapporté à tel ou tel savoir enseigné/appris ? (Mercier et al., 2002, p. 9)

Ainsi, l'étude articulée des dimensions générique et spécifique des phénomènes didactiques est un outil pertinent pour l'étude du fonctionnement des processus d'enseignement-apprentissage. Toutefois, on ne peut préférer l'une au profit de l'autre sans s'exposer au risque de négliger « la dimension anthropologique du processus » ou « la spécificité des objets qui sont les enjeux de la relation » (Mercier et al., 2002, p. 9).

La didactique comparée s'emploie alors à étudier le didactique « ordinaire », c'est-à-dire les pratiques d'enseignement-apprentissage telles qu'elles ont lieu dans les institutions concernées, sans intervention de la recherche pour les transformer (en dehors de tout projet d'ingénierie didactique en particulier).

Les pratiques du didactique ordinaire se donnent à voir dans leur spécificité liée aux savoirs en jeu dans le contexte observé, ainsi elles ne sont pas toujours comparables a priori. Pour établir la comparaison, la didactique comparée convoque des concepts à haut potentiel de généralité qui font fonction de *tertium*

---

<sup>66</sup> En italique dans le texte.

*comparationis* (Mercier et al., 2002, p. 10). Ce terme de comparaison permet de décrire la spécificité du phénomène didactique étudié tout en dégagant son caractère générique à travers une prise de distance permise par le principe de symétrie (Ligozat & Leutenegger, 2023). En d'autres termes, le tiers comparant permet de dégager des traits constitutifs de l'objet comparé qui resteraient invisibles — car naturalisés — s'il était observé en dehors du contexte de comparaison.

Ligozat et Leutenegger (2023) relèvent les concepts susceptibles de jouer le rôle de *tertium comparationis* : la transposition didactique de Chevallard (1985/1991) intervenant dans le cadre d'institutions didactiques et les situations didactiques introduites par Brousseau (1986, 1998), qui incluent les concepts de contrat didactique et de milieu.

Nous allons maintenant rappeler le contexte d'émergence de ces concepts fondateurs.

## 5.2 Système didactique et transposition didactique

### 5.2.1 Le système didactique

Pour modéliser les activités de transmission du savoir, Chevallard (1985/1991) propose un modèle insécable à trois pôles, occupés par le savoir, le professeur et l'élève : le *système didactique* (Figure 43).

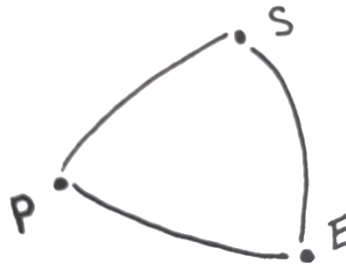


Figure 43 : le système didactique, d'après Chevallard (1991, p. 23)

Le système didactique est un système ouvert, c'est-à-dire qu'il subit et prend en compte les contraintes de son environnement. Ainsi, Chevallard (1985/1991) désigne par « système d'enseignement *stricto sensu*<sup>67</sup> » (p. 24) un ensemble de systèmes didactiques et les paramètres organisationnels qui permettent leur mise en relation. Le système d'enseignement *stricto sensu* est lui-même façonné par les prescriptions officielles et les choix des décideurs et décideuses politiques guidées par les recherches en sciences de l'éducation et du domaine académique concerné — instance que Chevallard (1985/1991) nomme la *noosphère*. Enfin, dernier niveau d'emboîtement, l'environnement des systèmes d'enseignement se compose bien entendu de la société dans laquelle il émerge. C'est pourquoi Assude et Mercier (2007) définissent le système didactique « comme l'ensemble des relations et des interactions entre plusieurs instances (le savoir, le professeur, l'élève) et plusieurs niveaux de sur-systèmes (le système d'enseignement, la noosphère, la société). » (p. 153) (Figure 44).

---

<sup>67</sup> En italique dans le texte.

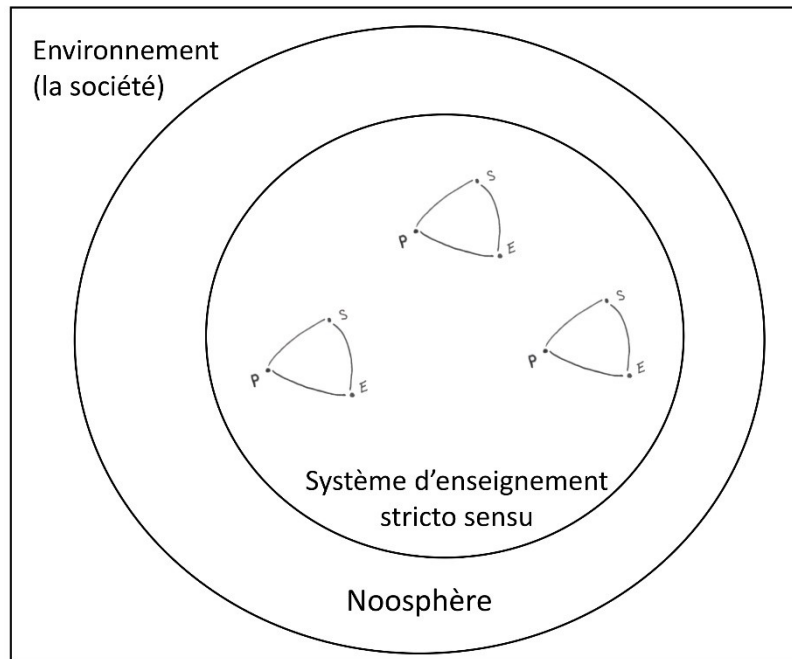


Figure 44 : systèmes didactiques et sur-systèmes, d'après Chevallard (1991, p. 24)

Dans le cadre de la didactique comparée, le système didactique est une unité théorique qui permet de modéliser différentes institutions (la classe de chimie au début du secondaire, en ce qui concerne notre étude). À l'instar de Mercier et al. (2002), nous considérons le système didactique comme un modèle central permettant la comparaison de pratiques inhérentes à des contextes institutionnels distincts. En effet, quelle que soit la classe observée, les interactions entre les trois composantes — savoir, professeur, élève — permettent d'accéder aux mécanismes d'enseignement et d'apprentissage du savoir mis à l'étude. Le haut potentiel de généralité du concept permet de comparer des situations d'enseignement-apprentissage qui peuvent se présenter de manières très différentes, comme des classes de niveaux d'enseignements distincts (primaire *versus* secondaire) ou des classes de même niveau, mais appartenant à des contextes institutionnels différents (le canton de Genève en Suisse et la France, en ce qui nous concerne), ou encore des situations de transmission du savoir dans et en dehors de l'école (musée, ateliers de médiation scientifique ou culturelle, etc.).

## 5.2.2 La transposition didactique

### 5.2.2.1 *Savoir savant, savoir expert, savoir de référence*

La transposition didactique désigne chez Chevallard (1985/1991) le processus de construction d'objets d'enseignement, à partir d'un savoir « savant » (cf. 1.3). Précisons maintenant ce que Chevallard (1985/1991) désigne par « objets de savoir ».

Tout d'abord, Chevallard considère qu'il y a objet de savoir seulement si le concept/la notion/le modèle considéré « apparaît utile à l'économie du système didactique<sup>68</sup> » (p. 49). Puis, la définition d'objet, strictement centrée sur la classe de mathématiques à travers les notions d'objets mathématiques, paramathématiques et protomathématiques (Chevallard, 1985/1991), s'élargit avec l'étude d'autres contextes de transmission du savoir de sorte que tout puisse être considéré comme objet (Bosch &

<sup>68</sup> En italique dans le texte.

Chevallard, 1999; Chevallard, 1992). Si, dans un premier temps, la notion de « savoir savant » a pu être interprétée comme ce qui relève d'une discipline académique – d'où l'expression « savoir académique » –, cette notion fera l'objet de nombreux débats dans le cadre de l'élargissement du concept de transposition à d'autres disciplines scolaires que les mathématiques (Chevallard, 1994).

Dans le cadre de la didactique de la physique en particulier, Johsua (1996) met en avant la multiplicité des sources de savoir qui contribuent à la structuration du domaine (recherche, industrie, ingénierie, activités domestiques, etc.). Cette objection est également formulée par les didactiques de disciplines dont la référence se trouve dans la pratique (l'Éducation physique et sportive, notamment). Mais plutôt que d'opposer savoir et pratique, Johsua (1996) propose de définir un « savoir expert » (p. 67), source de la transposition didactique au même titre que le savoir savant, mais faisant référence aux savoirs développés dans le cadre d'institutions non-académiques, mêlant pratique et théorie. Très ancré dans les pratiques sociales de son contexte de production qui garantissent sa légitimité, le savoir expert sera soumis à une dépersonnalisation moins intense que le savoir savant.

Les critiques formulées par Johsua (1996) à l'encontre du savoir savant font écho à la notion de « pratiques sociales de référence » introduite par Martinand (1986). Pour cet auteur, toute pratique d'enseignement s'appuie sur des pratiques sociales, c'est-à-dire « des activités objectives de transformation d'un donné naturel ou humain (“pratique”) [...] [qui] concernent l'ensemble d'un secteur social, et non des rôles individuels (“social”) » (Martinand, 1986, p. 137). Dans cette lignée, des didacticiens des sciences expérimentales, de l'informatique et des mathématiques font émerger le concept de « savoir de référence » (Arsac, 1996; Arsac et al., 1994), considérant que les disciplines académiques ne détiennent pas le monopole de la production des savoirs légitimes pour être enseignés à l'école.

Par ailleurs, la notion de « savoir savant » évolue dans les travaux de Chevallard, notamment avec le développement de la Théorie anthropologique du didactique (TAD) et l'introduction des *organisations praxéologiques* (Chevallard, 1999). Ainsi, Chevallard (1999) propose une modélisation de l'activité mathématique<sup>69</sup> en termes de *tâches* et de *types de tâches*, de *techniques*, de *technologies* et de *théories*. Dans le cadre de cette modélisation, pour un type de tâche donné, sont identifiés un bloc technico-théorique appelé « savoir » et un bloc pratico-technique appelé « savoir-faire » (p. 228). La TAD élargit la notion de savoir, au-delà des disciplines académiques.

La tension entre savoir académique et savoir de référence se retrouve dans notre analyse des curricula de chimie. En effet, nous mettons en évidence dans le chapitre 3 (cf. 3.1.2.3) que l'enseignement de la discipline au début du secondaire en Suisse romande et en France doit répondre à deux objectifs : construire le modèle de la réaction chimique et le mobiliser au service de l'étude de problèmes complexes liés à l'environnement. Dans ces deux objectifs, nous identifions deux enjeux distincts associés aux savoirs. L'enseignement et l'apprentissage du modèle de la réaction chimique reposent sur la transposition d'un savoir spécifique de la chimie scolaire (Kermen, 2018), tandis que les enjeux liés au réchauffement climatique renvoient plutôt à la compréhension d'un problème complexe qui demande de mettre en perspective des savoirs scientifiques avec des considérations politiques, économiques,

---

<sup>69</sup> Considérée comme un exemple parmi les activités humaines possibles. Le terme « activité » est employé dans son sens commun : « Caractère de ce qui est actif ou de l'être envisagé sous le rapport de son pouvoir ou de sa volonté d'agir ; exercice ou manifestation concrète de ce pouvoir. » (« Activité », 2012), pour désigner une *manifestation*, ici.

philosophiques, éthiques, etc. (cf. Chapitre 4). Cette approche complexe relève plutôt de pratiques sociales de référence que de savoirs académiques.

Dès lors, l'attribution à la discipline scolaire « chimie » de la prise en charge d'un problème environnemental tel que le réchauffement climatique interroge les conditions de sélection et de programmation de ces savoirs de référence. Intéressons-nous à certaines de ces conditions.

### 5.2.2.2 *Légitimité et enseignabilité des objets d'enseignement*

Dans le cadre de l'étude des problèmes environnementaux à l'école, la légitimité du savoir fait écho aux enjeux sociaux de notre siècle. Les instances qui constituent la noosphère confient à l'enseignement scolaire les grandes questions qui occupent les débats scientifiques, politiques et citoyens (cf. Chapitre 1).

L'enseignement d'un modèle disciplinaire tel que la réaction chimique ne pose pas les mêmes questions du point de vue de la société. Il s'agit plutôt d'un savoir légitime pour intégrer l'enseignement scolaire, car il est constitutif des savoirs produits et pratiqués par la discipline académique « chimie ». Il est alors sélectionné par la noosphère à ce titre.

Le contrôle social des apprentissages est l'un des cinq critères d'enseignabilité empruntés par Chevallard (1985/1991) à Verret (1975) et semble rejoindre la légitimité du savoir que nous venons de décrire à propos des problèmes environnementaux comme de la réaction chimique. En effet, les attentes sociales envers l'école peuvent concerner à la fois une contribution à la compréhension des grands enjeux de notre siècle et l'instruction des scientifiques de demain.

Parmi les quatre autres critères, la désyncrétisation du savoir opérée par la noosphère apparaît comme tout à fait pertinente dans le cadre du modèle de la réaction chimique, comme pour le problème du réchauffement climatique. Ce processus permet, à travers le discours, de mettre à plat les différentes dimensions du savoir, en particulier en explicitant les dimensions à apprendre et en rendant implicites celles qui ne le sont pas. Le discours opère alors une « délimitation de savoirs partiels » (Chevallard, 1991, p. 59). L'auteur ajoute que, si la délimitation de savoirs partiels par la noosphère est un processus conscient et fréquemment justifié, la désyncrétisation du savoir est rarement rendue explicite. Le processus paraît alors opaque.

Dans le cas de l'étude en classe d'un problème complexe telle que celui qui nous occupe — l'origine anthropique du changement climatique —, la désyncrétisation du savoir peut consister en une réduction de la complexité. En effet, le sens premier du terme *syncrétique* : « issu de la fusion de différents cultes, religions ou visions du monde » (« Syncrétique », 2012) se rapproche selon nous de la complexité telle que définie par Morin (1982) (cf. 1.2.1).

Cette réduction de l'épaisseur du savoir à des fins d'enseignement, pourrait selon nous s'accompagner d'un phénomène d'essentialisation, selon le sens courant de l'expression<sup>70</sup> : « essentialiser consiste à réduire une chose ou une personne à une seule de ses caractéristiques et à tenir cette caractéristique pour essentielle » (Cakpo, 2023). Les dimensions implicites ne sont alors plus accessibles pour l'élève, l'objet

---

<sup>70</sup> Nous utilisons ici l'extension du sens « d'essentialiser ». En effet, Cakpo (2023) identifie l'émergence récente du terme dans les discours militants relatifs aux questions de genres, de sexes, de races et de religions. Dans ces contextes, le terme revêt une intention péjorative, que nous ne retenons pas ici. Pour un complément sur l'origine du terme, écouter l'épisode du 17 septembre 2019 du *Journal de la philo* de France Culture (Mosna-Savoie, 2019).

d'enseignement se réduit aux dimensions explicites présentes dans le discours, ce qui pourrait entraîner des difficultés si l'objet enseigné relève d'un problème environnemental. En effet, la nature complexe de tels problèmes nous conduit à nous questionner sur la valeur essentielle<sup>71</sup> de la caractéristique qui pourrait subsister au processus d'essentialisation. Selon Morin (1990), l'étude de la complexité demande la prise en compte de chacune de ses composantes.

C'est pourquoi, si les processus de désyncrétisation et d'essentialisation paraissent indispensables pour rendre le savoir accessible aux élèves, dans le cadre de l'étude des processus d'enseignement-apprentissage, une attention particulière doit être portée au savoir effectivement enseigné, en particulier à sa plus ou moins grande proximité avec le savoir de référence.

Le deuxième critère d'enseignabilité, la dépersonnalisation, concerne également le problème du réchauffement climatique, comme le modèle de la réaction chimique. Ce critère désigne la désincarnation du savoir, c'est-à-dire la mise à distance du (ou des individus) qui en est (en sont) à l'origine, en particulier les fondements idéologiques qui en ont amorcé l'émergence (Arsac, 1996).

Le critère de programmabilité, qui désigne la possibilité d'organiser la progression des apprentissages en planifiant le savoir au sein de différentes séquences (Verret, 1975), semble aussi tout à fait opérant pour les deux catégories de savoirs dont nous discutons.

Le critère de publicité du savoir est potentiellement celui qui questionne le plus l'enseignabilité du réchauffement climatique, car il suppose de pouvoir définir précisément le savoir afin de le transmettre. Aussi, nous avons montré dans le chapitre 4 que la nature complexe des problèmes environnementaux entrave souvent leur définition dans le cadre scolaire, essentiellement organisé en des disciplines cloisonnées aux épistémologies distinctes (cf. 4.3.4.1).

Néanmoins, le problème du réchauffement climatique semble répondre aux conditions de légitimité et d'enseignabilité qui incombent aux savoirs scolaires.

### 5.2.2.3 *Étudier la transposition didactique*

La transposition didactique est un modèle descendant qui transforme le savoir à chacune de ces étapes. À ce propos, Johsua (1996) considère que le poids de l'institution « discipline scolaire » dans le travail de transposition didactique est tel qu'à son issue le savoir enseigné est très éloigné du savoir de référence.

Néanmoins, ce processus de transformation peut être analysé de manière ascendante. D'une part à partir des prescriptions officielles et manuels scolaires pour une étude de la transposition didactique externe (cf. 3.1.2.3), d'autre part à partir des pratiques de classe pour reconstruire la transposition didactique interne. Nous y reviendrons dans la section 5.5, pour le moment, intéressons-nous aux concepts apportés par la Théorie des situations.

## 5.3 Situations, contrat didactique et milieu

### 5.3.1 Le contrat didactique

Brousseau (1986) définit le contrat didactique comme un « système d'obligations réciproques » (p. 51) qui détermine ce que professeur et élève ont à responsabilité de gérer, mais aussi comme « la règle du

---

<sup>71</sup> Le terme est employé ici dans son sens philosophique : « de l'essence ; qui est essence » (« essence », s. d.).

jeu et la stratégie de la situation didactique » (p. 50). Ce contrat est dit « didactique », car spécifique de la connaissance en jeu. Selon Brousseau (2010), le contrat didactique désigne :

l'ensemble des obligations réciproques et des « sanctions » que chaque partenaire de la *situation didactique*

- impose ou croit imposer, explicitement ou implicitement, aux autres
- et celles qu'on lui impose ou qu'il croit qu'on lui impose, à propos de la connaissance en cause. Le contrat didactique est le résultat d'une « négociation » souvent implicite des modalités d'établissement des rapports entre un élève ou un groupe d'élèves, un certain milieu et un système éducatif. (p. 6)

Parce qu'il est implicite, le contrat ne peut être directement décrit à travers l'observation des situations didactiques. Il peut cependant être reconstruit à partir de l'étude de moments de rupture. Ces ruptures peuvent être provoquées par le professeur pour organiser la progression du savoir. Elles peuvent également être causées par des malentendus liés à des manques dans la définition de la tâche ou à la persistance dans le milieu d'enjeux précédents. Elles peuvent enfin témoigner d'un défaut de maîtrise d'un savoir sur lequel le professeur s'appuie pour faire avancer la construction du savoir visé.

Brousseau (1986) décrit également certains « effets » de contrat qui rendent compte d'un dévoiement du fonctionnement du contrat didactique, c'est-à-dire que le professeur agit de telle sorte dans la situation qu'il prive l'élève de l'accès à la connaissance. Par exemple, dans l'effet Topaze<sup>72</sup>, le professeur simplifie les questions posées aux élèves à l'extrême, tant est si bien que les connaissances finissent par disparaître de la situation. Pour montrer un autre exemple, dans l'effet Jourdain,<sup>73</sup> le professeur infère les connaissances visées à partir de n'importe quelle réponse fournie par l'élève, même les moins pertinentes. Le professeur est alors seul responsable de la construction du savoir.

### 5.3.2 Le milieu didactique

Dans l'élaboration de la Théorie des situations didactiques (TSD), Brousseau (1990) introduit la notion de « milieu » comme « l'ensemble des conditions extérieures dans lesquelles vit et se développe un individu humain » (p. 310). Dans le cadre de la TSD, le concept de milieu didactique « modélise seulement l'environnement spécifique d'un savoir ou d'un de ses aspects » (p. 113). Brousseau (1986, 1998) se place en effet dans la lignée des travaux de Piaget en considérant l'apprentissage comme fruit d'adaptations. Le milieu est alors considéré comme antagoniste au système enseigné — l'élève. Dans le cadre de la TSD, le milieu n'est pas l'environnement dans lequel se trouve le sujet, mais fait référence au domaine de la connaissance visée, en particulier aux objets « physique, culturel, sociaux, humains » qui le composent (Brousseau, 2010, p. 2). Ainsi, dans un système didactique donné, le milieu agit sur l'élève et l'élève agit sur le milieu. Dans le contexte de la TSD, le milieu sert donc de référence pour l'enseignement et provoque les adaptations nécessaires à l'apprentissage (Brousseau, 1998). En ce sens, il joue un rôle central dans la compréhension des phénomènes didactiques et est indissociable du concept de contrat didactique.

---

<sup>72</sup> Nommé d'après l'œuvre éponyme de Pagnol (1930).

<sup>73</sup> D'après le nom du personnage du *Bourgeois gentilhomme* (Molière, 1670).

Chevallard propose une définition du milieu que nous pourrions qualifier d'institutionnelle en comparaison avec la définition situationnelle de Brousseau. La présentation de cette définition demande d'introduire les concepts d'institution et de rapports aux objets.

#### 5.4 Institution, rapports aux objets et mésogenèse

##### 5.4.1 Le milieu chez Chevallard et les rapports personnels et institutionnels aux objets

La théorie développée par Chevallard (1992) est dite « anthropologique », car elle considère les savoirs comme fruits d'activités humaines, pratiquées dans le cadre d'institutions (Chevallard, 1999). Les institutions peuvent être définies à différentes échelles (l'école, la classe, les travaux pratiques, etc.), et dans différentes dimensions de la société (la culture partagée, le milieu social, la famille, etc.). Ainsi, Chevallard (1985/1991) considère les objets dès lors que ceux-ci ont une existence pour les sujets des institutions didactiques. Dans le développement de la TAD, Chevallard (1992) précise cette idée en définissant les concepts de *rapport personnel* et *rapport institutionnel* aux objets : « En d'autres termes, l'objet O existe s'il existe pour au moins une personne X ou une institution I, c'est-à-dire si au moins une personne ou une institution a un rapport à cet objet<sup>74</sup>. » (p. 86).

Jusqu'à présent, nous avons utilisé le terme « acteurs » pour désigner les protagonistes du système didactique. Chevallard distingue dans ses travaux les termes de « sujet » et de « personne ». En effet, Chevallard (1992) désigne un *sujet* comme toute personne « assujettie » à une institution (p. 89), alors qu'une *personne* occupe une fonction donnée dans une institution donnée à un temps donné. Le sujet qui entre dans une institution est alors soumis au rapport aux objets reconnus par cette institution — le *rapport institutionnel* —, ce qui suppose une évolution (ou construction, si l'objet n'existait pas encore pour la personne) de son *rapport personnel* à cet objet. Par conséquent, les changements de rapport personnel sont considérés par Chevallard (1992) comme des apprentissages. De plus, un sujet dont le rapport personnel peut être rapproché du rapport institutionnel à un certain objet est un « bon sujet » de l'institution (p. 90). Un « mauvais sujet » sera désigné selon la définition réciproque.

Chevallard (1992) définit donc la connaissance comme l'établissement d'un rapport à un objet. Ainsi, en TAD « un objet n'existe que parce qu'il est *objet de connaissance*<sup>73</sup>. » (p. 87). Dès lors, l'ensemble de ces objets constituent un *milieu institutionnel*, condition indispensable au fonctionnement d'un système didactique, puisque « préalable à tout projet d'enseignement » (Amade-Escot & Venturini, 2009, p. 25). À cette idée s'ajoute celle de la plasticité du milieu, au fil des interactions des sujets, et en fonction de leurs rapports aux objets constituant le milieu. Chevallard (1992) le désigne comme « *un construit permanent*<sup>73</sup> » (p. 95) sous l'effet du fonctionnement du système. L'étude des évolutions du milieu est appelée *mésogenèse*.

##### 5.4.2 Rapports public et privé aux objets d'un sujet dans le cadre d'une institution

Dans sa définition des rapports personnel et institutionnel aux objets, Chevallard (1992) précise que chaque personne est définie par l'ensemble des institutions auxquelles elle est assujettie, c'est-à-dire par l'ensemble de ses fonctions de sujet dans les diverses institutions qu'elle fréquente. Il s'agit de rendre visible un assujettissement plutôt qu'un autre, selon la situation. Ce phénomène est modélisable par la prise en compte des composantes public et privé des rapports au savoir. En effet, Chevallard (1992) envisage deux composantes du rapport personnel à un objet, depuis le point de vue de l'institution. La composante publique est rendue visible par le sujet, de telle sorte qu'elle peut servir de référence pour

---

<sup>74</sup> En italique dans le texte.

définir un « bon » ou un « mauvais » sujet, par comparaison au rapport institutionnel à l'objet. La composante privée, à l'inverse, échappe à l'évaluation de l'institution considérée. Ainsi, le sujet peut jouer sur le degré d'explicitation de certaines dimensions de son rapport personnel à l'objet, rendant public dans une institution ce qui était privé dans une autre, en fonction de ce qu'il perçoit des rapports institutionnels à l'objet.

L'étude des composantes publique et privée du rapport personnel des sujets semble un bon outil pour comprendre ce qui se joue au sein des systèmes didactiques dans la relation des sujets aux objets de savoir et ce que cela implique pour le fonctionnement du système didactique. Aussi, nous trouvons cet axe d'étude dans certains travaux (Mercier, 1995; Schubauer-Leoni & Ntamakiliro, 1994).

Dans le cadre de notre travail, la considération des rapports personnels/institutionnels et publics/privés des sujets aux objets du milieu devrait nous donner des indices quant au fonctionnement du contrat didactique et aux aménagements possibles du milieu.

## 5.5 Le modèle de l'action didactique conjointe

### 5.5.1 Une analyse ascendante de la transposition didactique

À l'appui des concepts fondateurs de la didactique des mathématiques que nous venons de présenter, la didactique comparée développe le *modèle de l'action didactique conjointe* (Ligozat & Leutenegger, 2023; Schubauer-Leoni et al., 2007; Schubauer-Leoni & Leutenegger, 2005) afin de décrire et comprendre le fonctionnement des systèmes didactiques, dans la lignée du modèle de l'action du professeur développé par Sensevy et al. (2000); Sensevy (2001). Cependant, à la différence de ce dernier, le modèle de l'action didactique conjointe, comme son nom l'indique, considère que l'action du professeur dépend de celle des élèves et donc qu'elles doivent être analysées ensemble (Schubauer-Leoni et al., 2007). Il s'agit, en particulier d'étudier la co-construction de la référence dans la classe par les sujets du système didactique (Ligozat & Leutenegger, 2008). Le modèle de l'action didactique conjointe considère alors l'interdépendance des actions du professeur et des élèves plutôt que le partage d'un « but commun » (Ligozat & Leutenegger, 2008, p. 326). Ces autrices pointent notamment la dissymétrie des postures des sujets enseignants et apprenants vis-à-vis de l'objet de savoir. C'est pourquoi elles parlent d'une « coordination » de l'action d'enseignement et l'action d'apprentissage (Ligozat & Leutenegger, 2023, p. 37). Comprendre une telle coordination suppose d'observer les sujets en action en caractérisant les situations qui orientent leurs actions.

Nous l'avons dit, la transposition didactique telle que théorisée par Chevallard (1985/1991) est un processus sociohistorique globalement descendant qui peut s'étudier de manière ascendante (Mercier, 2002; Schubauer-Leoni & Leutenegger, 2005), soit à partir des objets désignés comme à enseigner, soit à partir des objets effectivement enseignés (ou des opportunités de leur enseignement). Le modèle de l'action didactique conjointe propose une manière de faire, parmi d'autres. Ainsi, modéliser le fonctionnement du système didactique en termes d'action conjointe suppose une lecture ascendante qui articule *programme didactique* (au sens de Mercier, 2002) et *programme épistémologique* (au sens de Gascon, 1998) (Schubauer-Leoni & Leutenegger, 2005, p. 418). C'est pourquoi Ligozat et Leutenegger (2008) rappellent que l'enjeu du modèle de l'action didactique conjointe consiste à « dégager des catégories susceptibles de décrire et comprendre l'action didactique en situation d'enseignement et apprentissage sur des contenus spécifiés, et donc articuler l'étude des pratiques effectives avec l'étude transpositive des savoirs sous le couvert de différentes institutions » (p. 324). Pour ce faire, le modèle

propose d'entrer dans le fonctionnement des situations d'enseignement-apprentissage à travers l'étude de la relation contrat didactique-milieu.

### 5.5.2 La distinction tâche-situation

Schubauer-Leoni et al. (2007) rappellent que selon Brousseau (s. d.) les tâches sont des actions « connues, réalisables ou du moins envisagées comme telles » par les sujets de la situation (p. 60). Il y a donc une dimension explicite dans la définition des tâches au sein de la situation, au moins du point de vue de celui ou celle qui enseigne.

De plus, ces autrices insistent sur l'importance de distinguer la tâche de la situation à laquelle elle appartient. Notamment en rappelant que selon Brousseau, la situation inclut la tâche sans que la réciproque soit vraie. Ainsi, Marty et al. (2023) définissent une situation didactique

comme la conjonction d'un milieu initial (constitué par l'ensemble des consignes et objets proposés par l'enseignant pour engager les élèves dans une tâche) et des usages habituels développés en regard des éléments du milieu, que ces usages proviennent de la classe ou d'institutions externes à la classe (famille, par exemple). (p. 51)

D'un point de vue méthodologique, Schubauer-Leoni et al. (2007) soulignent la nécessité d'une prise en compte différenciée de la situation et des tâches dans les analyses. C'est pourquoi elles suggèrent, quand cela est possible, d'étudier dans un premier temps les tâches selon une analyse a priori et à travers une étude des pratiques, puis dans un second temps d'identifier « des éventuels *systèmes de tâches*<sup>75</sup> susceptibles de "faire situation" pour les élèves et l'enseignant. » (p. 61). Ces considérations méthodologiques les amènent à réfléchir à la compatibilité de leurs propositions avec la conceptualisation de l'action didactique conjointe en termes de « jeu » proposée par Sensevy (2007). Aussi, le développement du modèle de l'action didactique conjointe conduit Schubauer-Leoni et al. (2007) à se focaliser sur « le possible jeu entre "tâche", "milieu" et "situation" » (p. 62). En ce qui nous concerne, nous ne reprenons pas la modélisation en termes de « jeux didactiques » proposée par Sensevy (2007)<sup>76</sup> pour l'étude de l'interdépendance des actions du professeur et des élèves.

### 5.5.3 Le doublet contrat didactique-milieu

Sensevy (2001) reprend la définition de contrat didactique proposée par Brousseau dans le cadre de la TSD (cf. 5.3.1) en tant que « système d'attentes, à propos du savoir, entre le professeur et les élèves » (p. 323). Par l'idée « d'attentes », cet auteur fait référence au collectif tel que pensé en anthropologie. Sensevy (2001) considère alors le contrat didactique comme une forme spécifique de contrat « inhérent à la communication sociale » (p. 208). Dès lors, l'étude de ce contrat apporte un éclairage sur les actions des sujets du système didactique, puisque le sens de leurs actions à propos des objets de savoirs est élaboré à partir de ce contrat et évolue avec lui. Ainsi, nous ne pouvons inférer ce sens directement en observant les actions, mais devons prendre en considération les interprétations que les sujets ont faites du contrat didactique et qui ont donné du sens à ces actions.

Dans cette lignée et dans une démarche de didactique comparée, Schubauer-Leoni et Leutenegger (2005) définissent le contrat comme un « système d'attentes spécifiques à une organisation de connaissances » (p. 420). Pour ces autrices, l'étude du contrat didactique permet de comprendre le fonctionnement des sujets au sein du système didactique, en particulier en tant qu'outil de description des évolutions du

---

<sup>75</sup> En italique dans le texte.

<sup>76</sup> Sensevy (2007) propose une réinterprétation du concept de « jeu » introduit par Brousseau (1990, 1998) dans le cadre de la TSD.

milieu en situation (mésogenèse). Pour Amade-Escot et Venturini (2009), les évolutions du milieu observées *in situ* sont provoquées non seulement par les pratiques qui ont lieu dans le cadre des institutions et qui actualisent le contrat didactique (dimension institutionnelle), mais aussi par les effets directs du contrat sur les interactions des sujets (dimension situationnelle).

Le milieu est alors défini dans une acception plus large : « contingence des objets convoqués et des significations construites par les sujets, au fil de l'action dans la situation » (Ligozat, 2015, p. 19). Cette définition n'exclut pas la possibilité d'identifier dans la mésogenèse des structures antagonistes à même de « faire milieu » au sens de Brousseau (1990) pour des apprentissages spécifiques, c'est-à-dire offrant des résistances et des rétroactions.

D'un point de vue méthodologique, s'intéresser aux rapports des sujets aux objets du milieu — ou co-construction de significations — permet « de reconstruire *les enjeux du contrat didactique*<sup>77</sup> qui guide l'action des participants, et de voir comment ces enjeux évoluent et s'ajustent (ou non) dans le temps didactique. » (Ligozat, 2016, p. 295). En effet, Ligozat et Leutenegger (2023) rappellent que les enjeux du contrat didactique sont sans cesse renouvelés à travers l'introduction de nouveaux objets de savoirs dans le milieu. Milieu et contrat didactique sont donc des concepts articulés. Comprendre les aménagements du milieu suppose de prendre en compte les enjeux du contrat. Réciproquement, les enjeux du contrat sont visibles à travers l'étude de la mésogenèse. Pour réaliser une telle étude, il s'agit concrètement de mobiliser deux types d'outils empruntés au modèle de l'action du professeur (Sensevy et al., 2000) : le quadruplet de descripteurs de l'action du professeur et le triplet de genèses.

#### 5.5.4 Le quadruplet de descripteurs des structures fondamentales de l'action conjointe

Sensevy et al. (2000) proposent un quadruplet d'outils « structuraux pour la relation didactique » (p. 267) : définir, réguler, dévoluer, instituer.

Définir consiste pour le professeur à « *poser*<sup>77</sup> un certain nombre d'objets et établir le cadre d'une situation » (Sensevy et al., 2000, p. 268).

Aussi, le professeur « régule les *rapport*<sup>77</sup>, "fruits" de leur travail, que les élèves sont en train d'établir à la situation » (Sensevy et al., 2000, p. 269). Les régulations aménagent progressivement le milieu, notamment en réduisant certaines incertitudes du côté des élèves.

À travers la dévolution, le professeur offre aux élèves un espace de responsabilité dans la réalisation de la tâche.

Enfin, le professeur institue le savoir produit dans le milieu et identifié comme étant une référence pour les situations futures. Dans la définition d'« instituer » proposée par Sensevy et al. (2000), la notion d'institutionnalisation introduite par Brousseau (1984) est généralisée, dans le sens où elle est considérée

comme une dimension fondamentale d'un travail de *production d'institution*<sup>77</sup> : le professeur et les élèves s'instituent comme collectif de pensée comptable de leur production de savoir et ils s'autorisent à évaluer cette production. Ils identifient des manières de faire que l'institution qu'ils forment reconnaît comme légitimes : ce faisant, ils *produisent*<sup>77</sup> une institution fondée à valider les manières de faire, dont les élèves et le professeur sont ensemble les sujets. (p. 271)

---

<sup>77</sup> En italique dans le texte.

« Définir » et « réguler » forment un couple d'outils à la main du professeur, dans la mesure où il est responsable de l'aménagement initial de la situation, en fonction de ses objectifs d'enseignement-apprentissage. De même qu'il doit intervenir à travers les régulations pour accompagner les élèves dans la compréhension des enjeux de la situation et donc dans les apprentissages.

Le couple dévolution-institution est quant à lui le résultat d'actions du professeur et des élèves, et donc d'un certain fonctionnement collectif. En effet, le professeur fait en sorte que l'élève prenne la responsabilité qui lui est dévolue, ce dernier doit occuper cette responsabilité par l'action. Ainsi, un ou une élève dont la posture permet d'apporter au milieu des éléments favorables à son évolution aide le professeur dans son travail d'institution. C'est pourquoi élèves et professeur peuvent être considérés comme partenaires dans le travail de dévolution et d'institution. Ainsi, Schubauer-Leoni et al. (2007) renomment le quadruplet « structure fondamentale de l'action conjointe » (p. 59).

#### 5.5.5 Le triplet de genèses

Sensevy et al. (2000) décrivent trois objets qui orientent l'action enseignante : la mésogenèse, la chronogenèse et la topogenèse<sup>78</sup>.

En plaçant sa définition des concepts dans le cadre anthropologique, Sensevy (2001) considère toute situation d'ordre communicationnel, c'est-à-dire toute situation impliquant des interactions. Cette définition est précisée par le développement du modèle de l'action didactique conjointe qui étudie les situations spécifiques à la transmission de connaissances (formelles ou non-formelles). Les interactions entre les sujets de cette situation particulière sont décrites à travers trois dimensions qui possèdent leurs propres réseaux de descripteurs.

La première dimension concerne la construction de la référence, ou *mésogenèse*. Elle consiste en l'étude des aménagements des objets du milieu, au fil de l'évolution des rapports des sujets à ces objets et en fonction du contrat didactique, de sorte que ces objets fassent référence pour soutenir l'action didactique conjointe (Ligozat & Leutenegger, 2008, 2023; Schubauer-Leoni & Leutenegger, 2005).

Ligozat et Leutenegger (2023) précisent que les rapports des élèves aux objets contiennent toujours une part d'incertitude, qui, si elle n'est pas réduite par le professeur, peut être un obstacle à la progression du savoir collectif ou même empêcher son accès pour les élèves qui se situeraient trop loin du rapport institutionnel (les « mauvais sujets » au sens de Chevallard, 1992).

L'étude de la mésogenèse est donc primordiale, car sans connaissance de ce sur quoi et avec quoi les sujets agissent, il est impossible de décrire les dimensions relatives aux territoires et aux temporalités. L'étude de ces deux dernières ne suit pas un ordre privilégié.

La deuxième dimension, la *topogenèse*, étudie le partage des responsabilités entre le professeur — dont le topos est unique — et les élèves, et donc leurs changements de positionnement dans la prise en charge de certaines tâches d'une situation donnée. La topogenèse dépend notamment de la façon dont le professeur gère ce partage — contribuant au processus de dévolution —, mais aussi de la capacité de l'élève à investir (ou non) l'espace qui lui est confié (Ligozat & Leutenegger, 2008; Schubauer-Leoni et al., 2007; Schubauer-Leoni & Leutenegger, 2005).

---

<sup>78</sup> Le trio de concepts, *mésogenèse*, *topogenèse*, *chronogenèse*, est initialement introduit par Chevallard (1985, 1991). Selon lui, si la mésogenèse consiste en l'étude des dynamiques du milieu, le contrat didactique s'exprime sur l'axe du temps en fonction des positions des sujets. C'est pourquoi chronogenèse et topogenèse permettent l'étude de ces deux dimensions.

La troisième dimension, relative à la gestion des temporalités, est appelée *chronogenèse* et met en perspective temps didactique — relatif au projet d'enseignement — et temps d'apprentissage dans l'étude de la dynamique des objets. La chronogenèse est un levier à la main du professeur, dans la mesure où elle dépend de son projet d'enseignement (Ligozat & Leutenegger, 2008; Schubauer-Leoni & Leutenegger, 2005). Toutefois, certains apports des élèves au milieu peuvent favoriser une avancée du temps didactique. Dans ce cas, Sensevy (1998) qualifie l'élève de « chronogène ».

L'étude de ces trois dimensions se fait à partir de l'analyse d'épisodes<sup>79</sup> considérés comme étant significatifs, car représentatifs du traitement des tâches qui structurent la situation. L'article pionnier de Schubauer-Leoni et al. (2007) sur la catégorisation de l'action didactique conjointe propose des outils comme descripteurs des trois dimensions que nous venons de présenter (Figure 45).

<b>Mésogenèse</b> <i>Construction de la référence</i>	<b>Topogenèse</b> <i>Gestion des territoires</i>	<b>Chronogenèse</b> <i>Gestion des temporalités</i>
Désigner de nouveaux objets Définir des règles d'action pour entrer dans/traiter la tâche Construire ou désigner des traits pertinents Gérer les contradictions et proposer des alternatives	Posture de l'Ens en retrait, en accompagnement, mimétique, ou en surplomb	Appel à la mémoire didactique (rappel) Ralentissement ou accélération Anticipation Relance ou réorientation Confirmation, reconstruction, ou prolongement

Figure 45 : descripteurs de l'action didactique conjointe

Ainsi, le triplet de genèses (mésogenèse, topo-, chrono-) et le quadruplet de descripteurs des structures fondamentales de l'action conjointe (définir, réguler, dévoluer, instituer) permettent une analyse fine de l'articulation contrat-milieu. Du point de vue de notre recherche, ils nous offrent un cadre conceptuel pour la mise en œuvre de notre méthodologie d'étude des pratiques ordinaires d'enseignement-apprentissage de la chimie au secondaire.

En outre, la méthodologie d'étude ascendante de la transposition didactique permise par le modèle de l'action didactique conjointe suppose de s'intéresser en premier lieu au processus d'enseignement-apprentissage dans l'action, au sein même de la classe. Toutefois, son ancrage dans la théorie de la transposition didactique nous amène à considérer le système possible de déterminants de l'action didactique.

## 5.6 Outils complémentaires

### 5.6.1 Niveaux de codétermination didactique

Chevallard (2002) décrit différents *niveaux de détermination didactique*, comme un « ensemble de contraintes et de points d'appui » pour le système didactique (p. 9) : la société, l'école, la pédagogie, la discipline, le domaine, le secteur, le thème et le sujet. La relation entre ces niveaux peut être représentée par le schéma suivant (Figure 46) :

<sup>79</sup> Soit des extraits des séances observées.

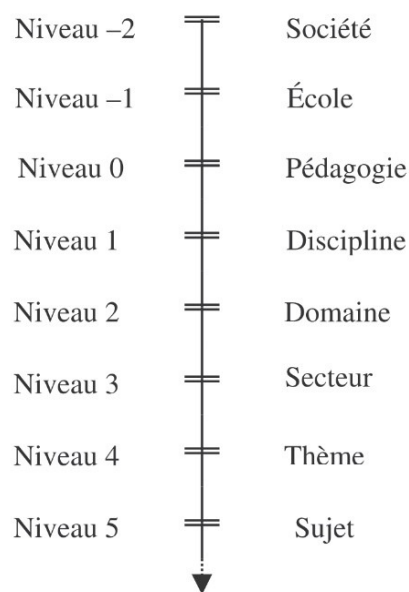


Figure 46 : niveaux de détermination didactique (Chevallard, 2002, p. 10)

Selon ce schéma, chaque niveau est conditionné par les niveaux qui le précèdent. Ainsi, si l'action enseignante se situe plutôt au niveau du ou des thème(s), elle est sous l'influence de la noosphère qui agit au niveau du secteur, du domaine et de la discipline.

L'ensemble de ces contraintes agit de façon concomitante sur le système, de sorte que Chevallard les renomme « niveaux de codétermination » dans la suite de ses travaux (Chevallard, 2007, 2010).

## 5.6.2 Déterminants de l'action conjointe

### 5.6.2.1 Une conceptualisation de l'action en trois strates

Au niveau de l'action conjointe professeur-élève, Sensevy (2007) propose une conceptualisation selon une stratification ternaire : l'action *in situ*, la construction de l'action en dehors de la classe et les déterminants de l'action.

Ligozat (2008, 2011) reprend et développe cette conceptualisation de la façon suivante :

- l'action *in situ* est décrite à la lumière de la relation contrat-milieu et grâce au triplet, mésogénèse, topogénèse, chronogénèse, dont nous avons parlé dans la section précédente (cf. 5.5.5) ;
- la construction de l'action est reconstruite à travers « l'analyse épistémique » (Sensevy, 2007, p. 36) des tâches élaborées par le professeur pour les élèves. Ce niveau d'analyse donne accès aux connaissances que le professeur active et vise par l'accomplissement de cette tâche, mais aussi le rapport du professeur aux objets de savoirs mobilisés par la tâche ;
- les déterminants de l'action représentent d'une part les contraintes institutionnelles, d'autre part les « soubassements épistémologiques » de l'action enseignante (Sensevy, 2007, p. 37), soit *l'épistémologie pratique* du professeur.

Ces déterminants de l'action conjointe professeur-élève peuvent être rapprochés des niveaux de codétermination décrits par Chevallard (2007, 2010), dans la mesure où ils désignent un ensemble de contraintes qui conditionnent l'action d'enseigner, dans ces dimensions extrinsèque (prescriptions officielles, influence de la noosphère, etc.) et intrinsèque (épistémologie pratique du professeur).

### 5.6.2.2 À propos de l'épistémologie pratique du professeur

Sensevy (2007) considère « l'épistémologie pratique des professeurs » (p. 38) comme spécifique du savoir enseigné, mais dépendant aussi des conceptions<sup>80</sup> du professeur à propos du fonctionnement de l'apprentissage — ce qui le favorise, ce qui l'empêche —, de la discipline en général, et émergeant *de la pratique pour la pratique*.

Amade-Escot (2019) rappelle cependant qu'avant d'être « pratique », l'épistémologie du professeur apparaît dans les travaux de Brousseau (1986) comme un modèle nécessaire pour comprendre le fonctionnement du système didactique *in situ*. Le lien avec la situation en contexte écarte donc une explication strictement mentaliste des déterminants de l'action enseignante. Cette idée se poursuit avec le tournant actionnel des recherches en SHS à l'aube du XXI<sup>e</sup> siècle, notamment dans le domaine de la didactique comparée. En adoptant une approche pragmatiste, ces recherches voient dans le concept d'épistémologie pratique, le moyen d'étudier les conditions de fonctionnement du système didactique, à la fois externe et interne à la classe et « d'accéder à une intelligibilité plus dense des pratiques enseignantes » (Marlot & Toullec-Théry, 2014, p. 8).

Ainsi, Marlot et Toullec-Théry (2014) identifient deux composantes participant à l'épistémologie pratique du professeur. La première dépend du sujet, elle se construit au fil de sa pratique, constitue un existant qui va teinter sa lecture de la situation et influence sa façon d'agir et de réguler les actions des élèves. La seconde dépend de la situation en elle-même, qui fait s'exprimer certains éléments de la première catégorie plutôt que d'autres.

Ligozat (2011) propose, quant à elle, d'organiser les composantes qui conditionnent l'épistémologie pratique du professeur selon un gradient à trois échelons. L'échelon le plus élevé relève des *préconstruits épistémologiques et pédagogiques*, respectivement relatifs à l'épistémologie de la discipline concernée et aux modèles d'enseignement-apprentissage qui structurent l'enseignement scolaire. Ceux-ci transparaissent à travers les prescriptions des textes officiels. L'échelon intermédiaire est défini par l'épistémologie professionnelle du professeur, c'est-à-dire la connaissance issue de ses expériences professionnelles au contact de — et en interaction avec — ses pairs. Enfin, le dernier échelon relève des stratégies issues des expériences personnelles du professeur dans sa pratique en classe, en fonction des contraintes d'espace et de temps qu'il peut expérimenter au quotidien, mais aussi dans sa relation aux élèves. Ces trois composantes de l'épistémologie pratique, proposées par Ligozat (2008, 2011), précisent et approfondissent le niveau de détermination établi par Sensevy (2007), que nous avons présenté dans la section précédente. Ils font également écho aux deux composantes de l'épistémologie pratique du professeur identifiées par Marlot et Toullec-Théry (2014). En particulier, l'épistémologie professionnelle et les stratégies issues de l'expérience personnelle du sujet enseignant peuvent être rapprochées de la composante liée à la pratique (Figure 47).

---

<sup>80</sup> Nous utilisons ici le sens commun du terme dans son usage métonymique : « idée ou représentation particulière d'un objet » (« Conception », 2012).

### Stratification ternaire de l'action conjointe (Sensevy, 2007)

- Action in situ

- Construction de l'action

- Déterminants de l'action

- Contraintes institutionnelles
- Épistémologie pratique du professeur

↳ Composantes de l'épistémologie pratique (Ligozat, 2011)

Préconstruits épistémologiques et pédagogiques

Épistémologie professionnelle

Stratégies issues des expériences personnelles de la classe

**Composante  
liée à la  
pratique**  
(Marlot et  
Toullec-Théry,  
2014)

Lien avec les **niveaux de codétermination didactique**  
(Chevallard, 2007, 2010)

Figure 47 : mise en relation des différentes descriptions des déterminants de l'action

Enfin, dans le cadre de l'enseignement de la physique, Hervé (2012) met en relation l'épistémologie pratique et le courant des recherches anglo-saxonnes sur la *Nature of Science* (NOS). Cet auteur considère en effet le terme « épistémologie » dans un sens large, aménageant ses significations française et anglaise. Ainsi, si le terme « *epistemology* » dans son acception anglophone désigne une « théorie de la nature de la connaissance, de ses fondements et de la manière de les acquérir » (p. 110), le terme utilisé en français fait spécifiquement référence au domaine des sciences et est ainsi parfois entendu comme une « philosophie des sciences » (« épistémologie, s.d. ». De plus, les recherches à propos de la NOS étudient l'influence des conceptions épistémologiques des enseignants et des enseignantes sur leurs pratiques, et par conséquent sur les conceptions épistémologiques des élèves. C'est pourquoi, en appui sur cette littérature, Hervé (2012) considère « l'épistémologie pratique de l'enseignant » comme « l'intrication des théories plus ou moins implicites de l'enseignant sur les savoirs scientifiques et sur les sciences, sur leur apprentissage et leur enseignement telles qu'elles s'actualisent dans la pratique » (p. 110). Bien que nous retrouvions ici des éléments de la notion de préconstruits épistémologiques et pédagogiques de Ligozat (2011), la définition proposée par Hervé (2012) a l'avantage d'apporter une dimension spécifique à l'épistémologie pratique.

En outre, l'auteur décrit le concept d'épistémologie pratique comme « faiblement théorisé » (p. 108), constat que nous partageons. De notre point de vue, la définition proposée par Hervé (2012) se rapproche d'un concept sociologique qui, mis au service de l'étude d'une situation d'enseignement-apprentissage, peut constituer un déterminant de l'action : le rapport au savoir.

#### 5.6.3 Les rapports aux savoirs dans une perspective sociologique

Jacky Beillerot met en évidence l'apparition de l'expression « rapport au savoir » dans les *Écrits* de Lacan (1966) (cité par Beillerot, 1989, p. 167). Dans cette expression, le mot « rapport » exprime le lien entre l'individu et quelque chose qui lui est extérieur. Tout sujet entretient une relation au savoir et se positionne vis-à-vis de cet objet.

Ce processus d'appropriation et donc de positionnement dépend du sujet et peut constituer un objet d'étude pour la psychologie, la sociologie, l'anthropologie ou encore les sciences de l'éducation.

D'autant plus que le sujet évolue dans un environnement social où il réalise l'activité d'apprendre au contact des autres, de ses pairs, de ses proches, du corps enseignant.

À partir des travaux de son équipe sur les inégalités scolaires, Charlot (1997) définit le rapport au savoir comme étant « un ensemble de relations de sens, et donc de valeur, entre un individu (ou un groupe) et les processus ou produits du savoir » (p. 93). Mais aussi comme :

l'ensemble des relations qu'un sujet entretient avec un objet, un « contenu de pensée », une activité, une relation interpersonnelle, un lieu, une personne, une situation, une occasion, une obligation, etc., liés en quelques façons à l'apprendre et au savoir — par là même, il est aussi rapport au langage, rapport au temps, rapport à l'activité dans le monde et sur le monde, rapport aux autres, et rapport à soi-même comme plus ou moins capable d'apprendre telle chose, dans telle situation. (p. 94)

En cohérence avec la nature socioanthropologique du concept, cet auteur identifie trois aspects du rapport au savoir : le rapport à soi, le rapport aux autres et le rapport au monde ; et deux dimensions : la *dimension épistémique* et la *dimension identitaire* du rapport au savoir.

Le rapport au monde fait référence à l'environnement, qui abrite et nourrit l'être humain (dans son sens biologique) et dans lequel il a une activité qui s'inscrit dans le temps. Le monde est aussi un concept pensé par l'être humain, auquel sont associés un langage et des modèles explicatifs. L'individu naît prématuré dans ce système qu'est le monde, il est alors soumis à l'obligation d'apprendre pour survivre. Son éducation va consister à apprendre l'ensemble des règles sociales et le savoir produit et transmis de façon collective. Ici intervient le rapport à l'autre. Parce que le rapport au savoir implique la transmission dudit savoir et donc une relation sociale avec les autres sujets du système didactique.

Se dessine alors la dimension identitaire du rapport au savoir : le sujet en situation d'enseignement-apprentissage va devoir se positionner dans un échange qui mobilise le langage. Il est lui-même empreint de culture, de croyances et des normes sociales qui gouvernent un tel échange.

Le rapport à soi traduit aussi la dimension identitaire du rapport au savoir. L'individu est un être singulier, il entretient une relation personnelle au savoir et lui donne du sens. En retour, la situation d'apprentissage influencera son estime de lui ; l'apprentissage permet d'avoir de nouvelles connaissances et développer des compétences et donc de potentiellement se réaliser, « devenir quelqu'un » (Charlot, 1997, p. 87).

La dimension épistémique du rapport au savoir renvoie à l'activité d'apprendre : s'approprier des objets virtuels et maîtriser une activité, en particulier grâce au langage (Charlot, 1997, p. 80). Ainsi l'élève peut plus ou moins se mobiliser selon si elle ou il trouve un intérêt dans la discipline enseignée, selon si cette dernière suscite sa curiosité intellectuelle ou encore si sa validation est la condition pour réaliser son projet d'orientation. Tout comme le rapport que l'enseignante ou l'enseignant entretient à un certain objet de savoir va conditionner la manière dont elle ou il présentera cet objet aux élèves. Notamment à travers les enjeux d'enseignement-apprentissage qui lui seront attribués et donnés à voir dans la conception de la séquence correspondante.

Pour terminer cette section, nous convoquons un dernier outil complémentaire pour l'étude des déterminants de l'action conjointe : le cadre des configurations didactiques (Simonneaux, 2011).

#### 5.6.4 Le cadre des configurations didactiques

S'intéressant à l'enseignement de questions socialement vives (QSV) économiques et sociales, Simonneaux (2011) élabore la notion de *configurations didactiques* « pour rendre compte de la construction de situations didactiques particulières, notamment pour analyser la diversité des situations possibles dans l'enseignement des QSV ou des sciences sociales et en identifier au mieux les enjeux éducatifs » (p. 148). Les configurations didactiques visent à évaluer la cohérence dans l'articulation de trois composantes : les attributs du savoir enseigné, la posture épistémologique de l'enseignante ou de l'enseignant et la stratégie didactique adoptée. L'auteur propose les valeurs que peuvent prendre ces trois composantes, à l'appui d'une étude épistémologique et didactique des possibles. Selon lui, l'attribut des savoirs scientifiques enseignés dans le cadre des QSV économiques et sociales peut être : universel, pluriel, engagé, ou contextualisé (Figure 48).

	Universel	Pluriel	Engagé	Contextualisé
Modalités dominantes d'élaboration des savoirs scientifiques	Modélisation, Vérité asymptotique Ruptures	Polyparadigmatique	Etude des incertitudes et des risques, Scientifisation réflexive	Vérifications empiriques

Figure 48 : attributs du savoir scientifique et modalités dominantes (Simonneaux, 2011, p. 91)

Les postures épistémologiques en regard de ces savoirs sont : le scientisme, l'utilitarisme, le réalisme critique et le relativisme (Figure 49).

	Scientisme	Utilitarisme	Réalisme critique	Relativisme
Rapport aux sciences	Sacralisation	L'intérêt des sciences se lit au regard de ses effets sur le monde	Les sciences produisent des savoirs, des controverses et des risques	Toute pensée mérite attention et peut être énoncée

Figure 49 : postures épistémologiques et rapport aux sciences induit (Simonneaux, 2011, p. 117)

Au regard de ces deux premières dimensions, les stratégies d'enseignement peuvent être : doctrinales (ou historiques), problématisantes, suscitant un questionnement critique, ou pragmatique (Figure 50).

	Historique / Doctrinale	Problématisante	Questionnement critique	Pragmatique
Finalités éducatives	Connaître et adhérer aux doctrines présentées	Construire un problème en mobilisant des théories	Développer l'esprit critique	Favoriser un comportement attendu
Scénarios privilégiés	Cours structuré, exposés, études de texte, pilotage par l'évaluation	Simulation, expérimentation, réalisation de diagnostic	Etudes de controverses, QSV, Débats, dérangement épistémologique,	Action, participation/ organisation de projets
Apprentissages privilégiés	Savoirs disciplinaires	Savoirs (inter)disciplinaires et méthodologiques	État des controverses, argumentation, réfutation, empowerment	(éco)gestes, gestion de projet...

Figure 50 : stratégies didactiques et quelques-unes de leurs caractéristiques (Simonneaux, 2011, p. 144)

Nous considérons que les trois dimensions des configurations didactiques de Simonneaux (2011) peuvent nous donner accès aux déterminants de l'action conjointe. En effet, les attributs du savoir enseigné sont déterminants pour le fonctionnement du système didactique. Ces attributs dépendent notamment des enjeux sociaux associés à ces savoirs — c'est le cas notamment des problèmes environnementaux —, de la façon dont ils sont présentés dans les prescriptions officielles et dans les ressources d'enseignement, mais aussi des choix de transposition réalisés par l'enseignant ou l'enseignante. La posture épistémologique de celles et ceux-ci dépendra en partie des caractéristiques du savoir, ainsi que du rapport (au sens de Charlot, 1997) qu'elles ou ils-y entretiennent, mais aussi de son épistémologie professionnelle, liée à la discipline enseignée. Ainsi, la stratégie didactique adoptée sera influencée par ces déterminants, mais aussi probablement par une certaine culture professionnelle, issue des expériences personnelles développée dans la pratique en classe.

Reconstruire les situations à travers la représentation des configurations didactiques semble alors pertinent pour saisir certains déterminants de l'action et leur articulation. Ce cadre nous offre un outil pour discuter des analyses réalisées sur différentes études de cas à propos de l'enseignement de la transformation chimique qui prend en charge l'étude d'un problème complexe lié au réchauffement climatique.

## 5.7 Conclusion du chapitre

Premièrement, en nous intéressant au système didactique « classe de chimie », nous nous confrontons à une tension dans le processus de transposition. En effet, les curricula de la discipline demandent d'aménager l'enseignement de deux types de savoirs : d'une part le modèle de la réaction chimique, savoir central de la structuration de la discipline scolaire, d'autre part le réchauffement climatique en tant que problème complexe. Cette tension met en doute la légitimité et l'enseignabilité des objets de savoir complexes dans le cadre de la classe de chimie.

Deuxièmement, nous identifions dans le modèle de l'action didactique conjointe, un certain nombre d'outils pour l'étude des pratiques d'enseignement-apprentissage selon une lecture ascendante de la transposition didactique. Ce modèle permet de considérer l'action du sujet enseignant en étroite articulation avec celle de l'élève. Le développement du triplet, mésogenèse, topogenèse, chronogenèse, complété par les descripteurs de la structure fondamentale de l'action conjointe — définir, réguler, dévoluer, instituer — permet l'étude des situations d'enseignement-apprentissage à travers la relation contrat didactique-milieu.

L'étude des situations de transmission de savoirs en classe dépend également de la prise en compte des rapports aux objets de savoirs que développent les sujets, dans leurs dimensions publique et privée. Objets qui constituent le milieu de l'action. Aussi, nous avons montré la nécessité de l'élargissement de la définition du milieu dans le cadre du modèle de l'action didactique conjointe, vis-à-vis de celles proposées en TAD et en TSD : soit un milieu toujours sous contrat, définissant pour le sujet une situation porteuse d'un enjeu — enjeu qui doit se négocier au fil de l'action.

Enfin, le déroulement de l'action en classe est en réalité structuré par plusieurs niveaux de détermination didactique qui s'organisent par emboîtements. Ainsi, l'étude des contraintes institutionnelles qui structurent la situation (niveau extrinsèque) ou encore la recherche d'indices révélant l'épistémologie pratique du professeur ou de son rapport aux savoirs (niveau intrinsèque) sont autant de déterminants à considérer, car utiles pour l'interprétation des actions des sujets en situation. Le cadre des configurations

didactiques développé par Simonneaux (2011) devrait nous aider dans la description de ces déterminants.

La prise en main de ces outils nous permet d'avancer dans la formulation de notre problématique, objet du prochain chapitre.

## CHAPITRE 6 — PROBLÉMATIQUE

En introduction de ce travail, nous avons montré que les instances internationales, influencées par les demandes des sociétés, confient à l'École une double mission : instruire et éduquer. Dans l'enseignement des sciences qui nous concerne plus particulièrement, cette double mission s'illustre selon deux enjeux : former la relève scientifique tout en permettant à chaque élève de développer une culture scientifique et technique (CST) nécessaire pour comprendre les défis du monde actuel. Les problèmes environnementaux sont un exemple saillant des problèmes auxquels nos sociétés sont confrontées. Si elles questionnent les communautés scientifiques depuis l'ère industrielle (Jarrige, 2016), ces questions intègrent les curricula francophones dans le courant des années soixante-dix (Girault & Sauvé, 2008). Dès lors, leur dimension complexe (au sens de Morin, 1982) se confronte à des enseignements cloisonnés par la structure des disciplines scolaires, en particulier au secondaire.

D'une part, la revue de littérature exploitée dans le chapitre 4 met en évidence que si l'interdisciplinarité ou les approches de type « Éducation à... » — en particulier Éducation à l'environnement (ÉE) et Éducation au développement durable (EDD) — paraissent séduisantes sur le plan théorique pour la collaboration des disciplines dans l'étude de questions complexes telles que les problèmes environnementaux, elles posent en réalité un certain nombre de difficultés au moment de leur mise en œuvre dans les classes. Certaines études mettent en évidence les obstacles que peuvent constituer de telles approches pour les élèves si elles se contentent de juxtaposer les contenus sans expliciter les matrices disciplinaires — et donc les épistémologies — auxquelles ils se rattachent (Lenoir & Hasni, 2016; Orange Ravachol, 2013; Schneuwly, 2016) (cf. 4.1).

D'autre part, notre étude des curricula français et suisse-romand, objet du chapitre 3, montre que les problèmes environnementaux ne sont pas abordés dans le cadre des enseignements de chimie au début du secondaire dans ces deux contextes. Bien que de nombreuses études internationales préconisent différentes approches pour mettre en œuvre cette articulation, et que les enseignants et enseignantes de chimie déclarent identifier l'importance d'enseigner de tels problèmes, ces derniers sont majoritairement pris en charge par les disciplines scolaires biologie/géologie/SVT. Pourtant, l'étude épistémologique du savoir enseigné à ce niveau, que nous développons dans le chapitre 2, montre le rôle essentiel que joue le modèle de la réaction chimique pour comprendre les transformations de la matière en jeu dans le cycle du carbone, en particulier le rôle des activités humaines industrielles dans la production de dioxyde de carbone dans l'atmosphère, gaz considéré comme étant « à effet de serre ». Aussi, nous proposons à la fin du chapitre 4, le réseau conceptuel permettant l'étude de l'origine anthropique du réchauffement climatique. Celle-ci implique la mise en relation de modèles biologiques, géologiques, chimiques et physiques : le cycle du carbone, la réaction chimique et le principe de conservation de la matière, l'effet de serre, les interactions rayonnement-matière et la dualité onde-corpuscule. En effet, il semble que le cycle du carbone soit un objet codisciplinaire au sens de Chevillard (2004), c'est-à-dire qu'il permet l'étude d'un problème complexe par la confrontation de matrices disciplinaires distinctes — en l'occurrence, biologie, géologie et chimie —, qui s'enrichissent mutuellement dans la modélisation de la complexité.

L'ensemble de ces constats nous amène à formuler un premier niveau de problématique :

## **Comment l'enseignement de la chimie au secondaire I peut-il contribuer à la construction d'une CST qui concerne, en particulier, la compréhension de l'origine anthropique du réchauffement climatique ?**

Cette problématique émerge de notre étude de la transposition didactique externe à la fois des savoirs de chimie au début du secondaire, mais aussi du modèle du cycle du carbone et, par extension, du problème de l'anthropocène. En effet, notre étude a porté jusqu'alors sur les prescriptions officielles et les ressources d'enseignement. Grâce à notre enquête par questionnaire, nous avons approché certaines dimensions des pratiques enseignantes. Nous nous sommes ainsi approchée des portes de la classe, sans toutefois en franchir le seuil. Néanmoins, nous ne pouvons prétendre comprendre les processus d'enseignement-apprentissage relatifs à un savoir disciplinaire, sans observer les mécanismes à l'œuvre dans les situations de transmission de ce savoir. Ainsi, il s'agit à présent de nous concentrer sur la transposition didactique interne à la classe : du savoir à enseigner au savoir enseigné (jusqu'au savoir appris ?).

Premièrement, la question de l'étude des pratiques ordinaires en chimie est d'autant plus importante qu'elle est rarement étudiée dans les recherches en didactique, comme le montrent les résultats de notre revue de littérature sur l'enseignement de la transformation chimique présentée en introduction du chapitre 2.

Deuxièmement, nous proposons d'adopter une méthodologie singulière en étudiant les aménagements possibles du système didactique « classe de chimie » face à l'insertion du cycle du carbone dans l'enseignement de la transformation chimique. En nous plaçant dans le cadre du modèle de l'action didactique conjointe (Ligozat & Leutenegger, 2023; Schubauer-Leoni et al., 2007; Schubauer-Leoni & Leutenegger, 2005) présenté dans le chapitre 5, nous procédons à une analyse ascendante de la transposition didactique, c'est-à-dire élaborée à partir des objets de savoir effectivement enseignés. À cette fin, nous nous intéressons à l'articulation contrat didactique-milieu à travers l'étude des significations produites par les élèves, visibles dans leurs actions, et régulées voire instituées par l'enseignant ou l'enseignante, contribuant ainsi à la co-construction de la référence (mésogenèse). L'étude de la coordination de l'action enseignante en fonction de l'action des élèves sur les objets du milieu se fait notamment grâce à la topogenèse (étude des postures des sujets) et la chronogenèse (étude de la progression du temps didactique).

Ainsi, nous formulons quatre questions de recherche (QR) qui précisent notre problématique.

**QR1 : Comment le système didactique relatif à la transformation chimique peut-il intégrer l'étude du cycle du carbone, objet codisciplinaire qui soulève un problème complexe relatif au réchauffement climatique ? En particulier, comment l'élaboration de la relation contrat-milieu peut-elle s'adapter à l'étude de cette complexité ?**

L'étude de cette question demande l'articulation de plusieurs échelles d'analyse. En effet, si les éléments précurseurs du contrat didactique — c'est-à-dire les dimensions pensées par le sujet enseignant dans sa conception de la séquence — apportent des éléments de réponse à cette question (niveaux macro et méso), caractériser les évolutions de la relation contrat-milieu demande d'observer les interactions des sujets avec les objets présents/introduits dans le milieu (niveau micro). Nous regardons, en particulier si les rapports des sujets à l'objet « transformation chimique », en tant qu'indicateurs de la mésogenèse, évoluent à la suite de l'introduction du cycle du carbone.

**QR2 : Comment l'enseignant ou l'enseignante de chimie utilise-t-il ou elle le cycle du carbone dans sa séquence sur la transformation chimique ? Quelle place est accordée dans le partage des responsabilités ? Quelles conséquences pour l'avancée de la chronogène ?**

Si la QR1 nous permet de caractériser les différents milieux élaborés dans ces situations, la deuxième question de recherche est centrée sur le contrat didactique et ses effets sur l'aménagement du milieu, la gestion des territoires et des temporalités. Nous cherchons en effet à caractériser les attentes du sujet enseignant vis-à-vis de l'objet « cycle du carbone », ainsi que ce qui en est perçu par les élèves à travers les significations produites, les positions des sujets et la dynamique du temps didactique. Ainsi, le triplet de génèses soutient l'étude des conditions de mise en œuvre d'un enseignement codisciplinaire d'un problème environnemental en classe de chimie, en particulier à travers la définition d'indicateurs de codisciplinarité.

**QR3 : Quelles traces de l'appropriation du modèle de la réaction chimique sont visibles en situation dans le raisonnement des élèves à propos de l'origine anthropique du réchauffement climatique (problème complexe) ?**

En élaborant un réseau conceptuel des savoirs scientifiques impliqués dans l'étude de l'origine anthropique du réchauffement climatique, nous formulons l'hypothèse selon laquelle la réaction chimique et le principe de conservation de la matière sont nécessaires à l'étude de ce problème complexe. La troisième question de recherche repose sur cette hypothèse. Nous nous intéressons alors au savoir enseigné, dans sa transaction entre les sujets enseignants et apprenants. Une telle étude demande un grain d'analyse très fin, au niveau des interactions des élèves avec des objets de savoirs identifiés dans le milieu comme significatifs de l'étude du problème complexe.

**QR4 : En adoptant une approche codisciplinaire de l'enseignement de la transformation chimique, quelles traces de la compréhension de l'origine anthropique du réchauffement climatique peut-on trouver chez les élèves ?**

Enfin, la quatrième question de recherche se focalise sur la dernière extrémité de la transposition didactique : le savoir appris. À travers la QR4, nous cherchons à confirmer l'hypothèse que nous avons formulée au terme du chapitre 4, à savoir : l'introduction d'un objet codisciplinaire dans l'enseignement de savoirs spécifiques favorise l'étude d'un problème complexe dans le cadre de la chimie au secondaire I.

Pour répondre à notre problématique et nos questions de recherche, nous mettons en place une méthodologie d'étude des pratiques ordinaires de type clinique/expérimentale (Schubauer-Leoni & Leutenegger, 2002) que nous explicitons dans le chapitre 7.

## **TROISIÈME PARTIE : MÉTHODOLOGIE**

## CHAPITRE 7 — RECUEIL DE DONNÉES SELON UNE APPROCHE CLINIQUE/EXPÉRIMENTALE DU DIDACTIQUE ORDINAIRE

Dans ce chapitre, nous exposons la première étape de l'approche clinique/expérimentale du didactique ordinaire qui consiste à recueillir les traces de l'action des sujets en situation. La seconde étape, consacrée aux analyses des traces et donc au processus d'explication/compréhension des phénomènes, sera explicitée dans le chapitre suivant.

### 7.1 À propos de la démarche clinique/expérimentale

Schubauer-Leoni et Leutenegger (2002) considèrent que l'étude des phénomènes didactiques ordinaires, en tant qu'objets de recherche de la didactique comparée, permet « une double dialectique » (p. 227) entre explication/compréhension d'une part et approche clinique/approche expérimentale d'autre part. En effet, selon ces autrices, le processus d'explication/compréhension demande de comparer les événements. Pour cela, une démarche de récoltes de *traces* doit être mise en œuvre pour reconstruire les actions et le récit des sujets en situation, à l'instar de la démarche d'un ou une médecin qui constitue les signes cliniques de la maladie à partir du tableau des symptômes observés et objectivés en fonction des connaissances médicales. Dans cette lignée, l'approche clinique/expérimentale propose un point de vue sur les situations d'enseignement-apprentissage qui tient compte du regard du chercheur ou de la chercheuse. C'est-à-dire qu'une telle approche n'est pas strictement empirique, mais considère que les traces recueillies sont identifiées par l'œil avisé de celui-ci ou de celle-ci, guidé par des arrière-plans théoriques, et interprétés de sorte à constituer des *signes*. La perspective comparatiste ajoute une dimension expérimentale à l'approche clinique, en faisant intervenir un *tertium comparationis* pour comparer des systèmes très différents (cf. 5.1). La méthode comparative est ainsi considérée par Durkheim (1901/1937) comme une méthode « d'expérimentation indirecte » (cité par Schubauer-Leoni & Leutenegger, 2002, p. 236).

Selon Schubauer-Leoni et Leutenegger (2002), l'étude du didactique ordinaire dans une perspective comparatiste a une intention descriptive. Il s'agit pour cela de modéliser l'action « effective » (p. 233) des sujets du système didactique et leurs conséquences. Le système fait fonction d'unité d'observation insécable. Ainsi, l'analyse d'un des sous-systèmes — savoir, professeur ou élève — dépend des autres et ne pourra donc être isolée. De plus, l'inscription dans la théorie de la transposition didactique (Chevallard, 1985/1991) suppose de prendre en considération l'institution qui contraint l'émergence des objets de savoirs étudiés au sein du système didactique. Dès lors, l'analyse devra prendre en compte le système de déterminants de l'action didactique (cf. 5.6).

### 7.2 L'observation des pratiques ordinaires

Dans l'objectif de préparer nos observations des pratiques effectives, nous réalisons une analyse a priori du savoir en jeu. En effet, l'approche clinique/expérimentale de la didactique ordinaire préconise une telle étude épistémologique. Celle-ci, en révélant les caractéristiques des tâches prescrites, donne accès « au modèle sous-jacent à l'activité qui sera observée » (Schubauer-Leoni & Leutenegger, 2002, p. 242). Nous y reviendrons dans le chapitre 8 (cf. 8.1.3).

Les actions des sujets en situation constituent le premier type de trace recueilli. Ainsi, l'observation des pratiques ordinaires d'enseignement-apprentissage est réalisée au moyen d'enregistrements audio et

vidéo. Notre dispositif d'observation comprend : 1) une caméra au fond de la classe qui enregistre un point de vue global sur les mouvements des sujets au cours de la séance, celle-ci enregistre le discours de l'enseignante ou de l'enseignant au moyen d'un micro-cravate et est manipulée par la chercheuse (mouvements de champ, zoom) en fonction des actions observées ; 2) une caméra fixe orientée sur un binôme d'élève qui observe notamment les traces écrites produites au cours de la séance, d'éventuelles manipulations d'objets, et enregistre leurs discours (Figure 51).

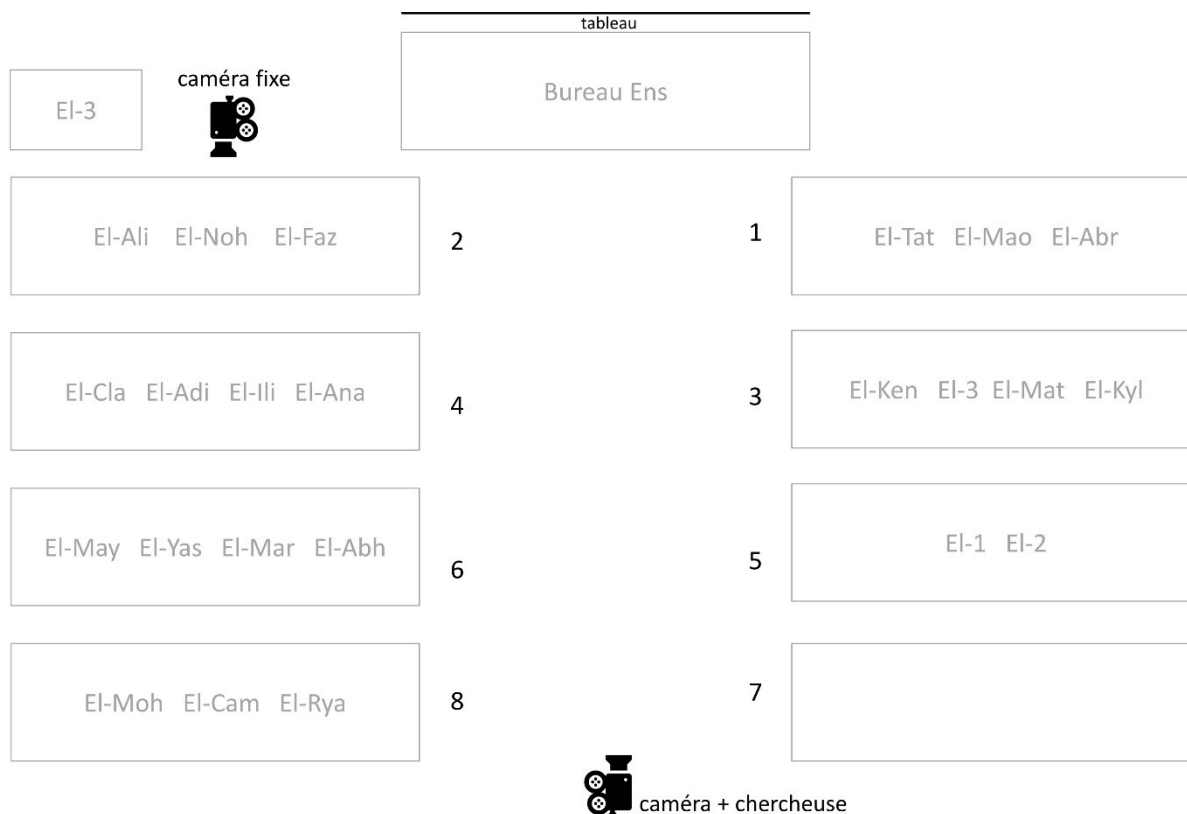


Figure 51 : plan d'une des classes observées avec position des deux caméras

Les données vidéo et audio ainsi recueillies constituent une collection de traces *internes* à la séance (Schubauer-Leoni & Leutenegger, 2002). Elles sont complétées par les traces *externes*, récoltées notamment à travers des entretiens d'explicitation de type semi-directif (Vermersch, 1991) *ante-* et *post-*observations.

En effet, des entretiens *ante-*observations sont menés avec les sujets enseignants dans l'objectif de recueillir leur discours sur la séquence observée, leurs intentions, les enjeux qu'ils identifient. C'est pourquoi le canevas d'entretien que nous avons élaboré repose sur l'analyse a priori des tâches prévues par l'enseignant ou l'enseignante dans ses documents de préparation (un autre type de trace externe, nous y reviendrons) (Schubauer-Leoni & Leutenegger, 2002). L'entretien *ante* permet également de mieux connaître les élèves à travers le discours du sujet enseignant à qui nous demandons d'estimer le niveau du groupe en chimie — donnée objectivée par la moyenne de la classe aux évaluations —, ainsi que les éventuelles difficultés rencontrées sur le plan des apprentissages et sur le plan de la gestion du groupe classe. Ces questions sont l'occasion d'identifier avec l'enseignant ou l'enseignante les élèves qui feront l'objet d'observations à travers la caméra fixe.

Les entretiens *post*-observations concernent les sujets enseignants et apprenants. Ces entretiens sont l’occasion de « revisiter la séance à travers la reconstruction discursive de l’acteur » (Schubauer-Leoni & Leutenegger, 2002, p. 244). Nous invitons l’enseignante ou l’enseignant à partager son sentiment et son analyse sur la mise en œuvre de la séquence qui vient d’avoir eu lieu. Nous l’interrogeons à nouveau sur ses intentions et les enjeux associés à la séquence, ainsi que sur les réussites ou difficultés éventuelles rencontrées par les élèves de son point de vue. Les entretiens avec des élèves de niveaux nuancés (élève avec de bons résultats, élève en difficulté), nous permettent de reconstruire à travers leurs discours les tâches dont ils et elles se souviennent. Ces questions fonctionnent sur le principe d’un *bilan de savoirs* au sens de Charlot (1999) pour encourager l’élève à dire « ce qui, pour elle ou pour lui, présente suffisamment d’importance, de sens, de valeur pour qu’il l’évoque » (p. 8). Nous les interrogeons en particulier sur ce qu’ils et elles ont fait à tel ou tel moment de la séquence afin de saisir les postures potentiellement adoptées. En effet, les entretiens utilisés comme « *discutants*<sup>81</sup> des phénomènes identifiés dans la séance en classe » sont des traces externes particulièrement importantes pour réduire l’incertitude liée à l’interprétation des observations *in situ*. L’ensemble des entretiens sont menés dans l’établissement scolaire des sujets, sur des temps extrascolaires pour les élèves (pendant les récréations ou sur le temps de pause méridien) ou parfois pendant le cours de physique-chimie, en parallèle d’une séance d’exercices par exemple. Ces entretiens sont menés systématiquement après chaque phase d’observation de la séquence en classe (phase 1 et phase 2). L’enseignant ou l’enseignante sollicite deux élèves. Avec leur accord, nous réalisons les entretiens en parallèle de la séance ou juste après. Toutefois, nous n’avons pas pu mettre en œuvre ces entretiens auprès des élèves d’une enseignante française en phase 1 d’observations (Aurélie<sup>82</sup>), notamment à cause des mesures de distanciation sociale en vigueur dans les établissements scolaires à la rentrée scolaire 2020 dans le contexte de la pandémie de la COVID-19.

L’entretien *ante*-observations, les observations des séances de classe et les entretiens *post*-observations forment une *boucle d’observables*. Boucle qui pourra être répétée si le dispositif d’observation est mis en œuvre sur un temps long (plusieurs mois à une année). En ce qui nous concerne, notre dispositif d’observation concerne l’enseignement de la transformation chimique chez les mêmes sujets enseignants sur deux années consécutives. Nous élaborons ainsi deux boucles d’observables (Figure 52).

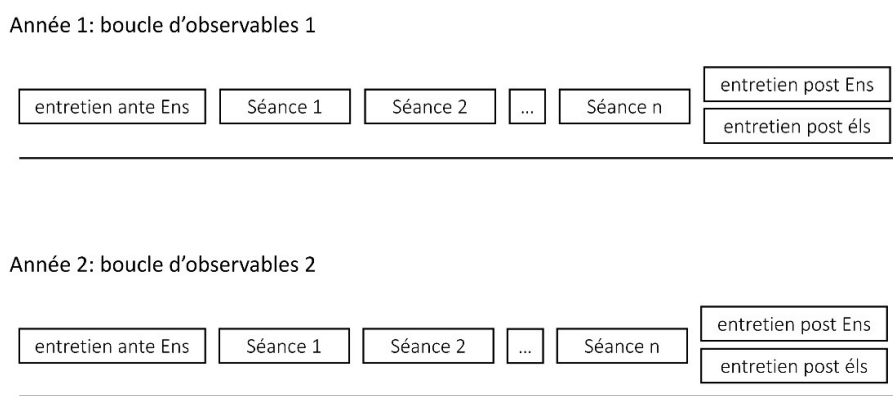


Figure 52 : dispositif d’observation sur deux ans

<sup>81</sup> En italique dans le texte.

<sup>82</sup> Tous les prénoms que nous employons dans ce chapitre sont fictifs.

Chez un enseignant (Gauthier), la phase 1 d'observations présente deux boucles d'observables. En effet, à la suite de notre entretien de prise de contact, cet enseignant nous a invitée à observer deux séquences d'enseignement dans ses pratiques ordinaires. La première relative à l'enseignement de la transformation chimique à travers le thème de la cuisine (Boucle 1.1). La seconde concerne le réinvestissement des concepts et modèles de physique et de chimie au service de l'étude de problèmes environnementaux (Boucle 1.2) (Figure 53).

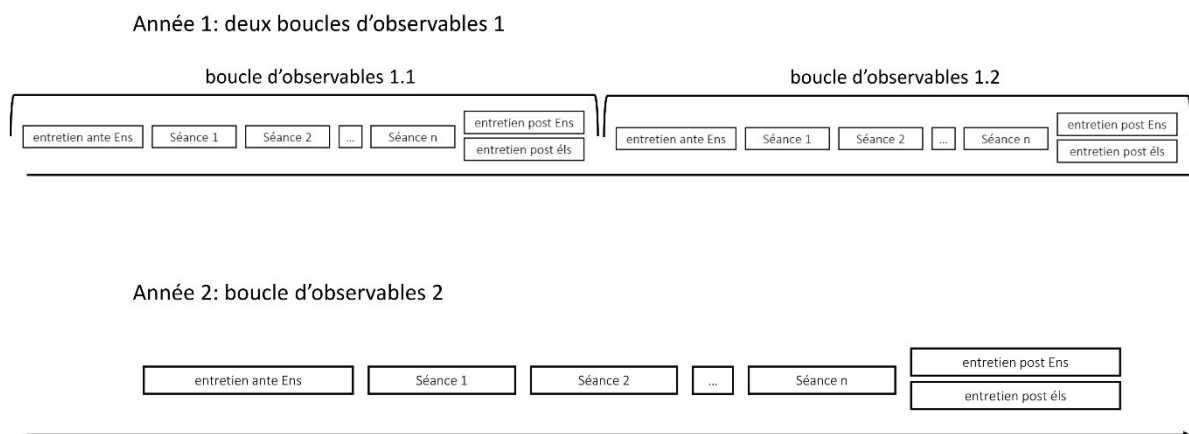


Figure 53 : deux boucles d'observables chez Gauthier en phase 1 d'observations (année 1)

En outre, tous les écrits produits par les sujets contribuent à la collection des traces externes. Il peut s'agir des documents de préparation du sujet enseignant, mais aussi des documents à destination des élèves (support de cours sous forme de diaporama vidéoprojeté au tableau, photocopies de bilan de cours ou d'énoncés d'exercices, etc.), y compris les inscriptions au tableau (texte et schémas). Du côté des élèves, nous récoltons les traces écrites au moyen de la caméra fixe. Les entretiens *post*-observations offrent l'occasion d'observer les cahiers des élèves ainsi que leurs évaluations par l'intermédiaire de l'enseignant ou de l'enseignante. Les recoupements successifs de ces traces avec celles relevées dans les observations en classe et lors des entretiens contribuent à la reconstruction de la dynamique du système didactique.

Schubauer-Leoni et Leutenegger (2002) indiquent que le chercheur ou la chercheuse peut contribuer à l'émergence des traces en procédant à l'implantation d'un élément étranger dans le système étudié. Si la première phase de notre dispositif d'observation est consacrée à la stricte observation des pratiques ordinaires (phase 1 — année 1), nous employons la méthode dite « de la greffe » dans la méthodologie d'observation de la seconde année (phase 2 — année 2).

### 7.3 Implanter une greffe dans le système didactique

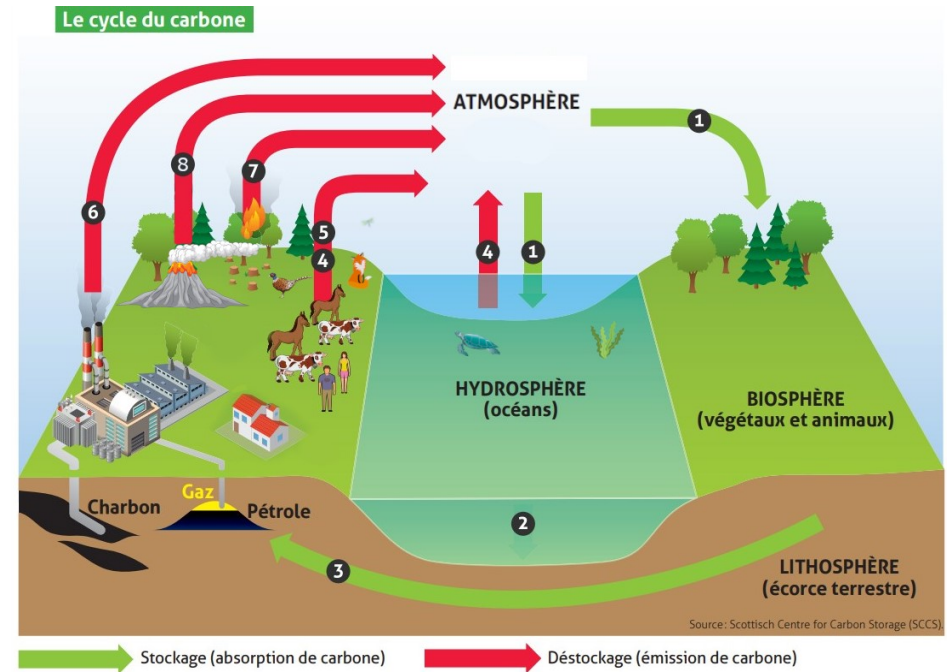
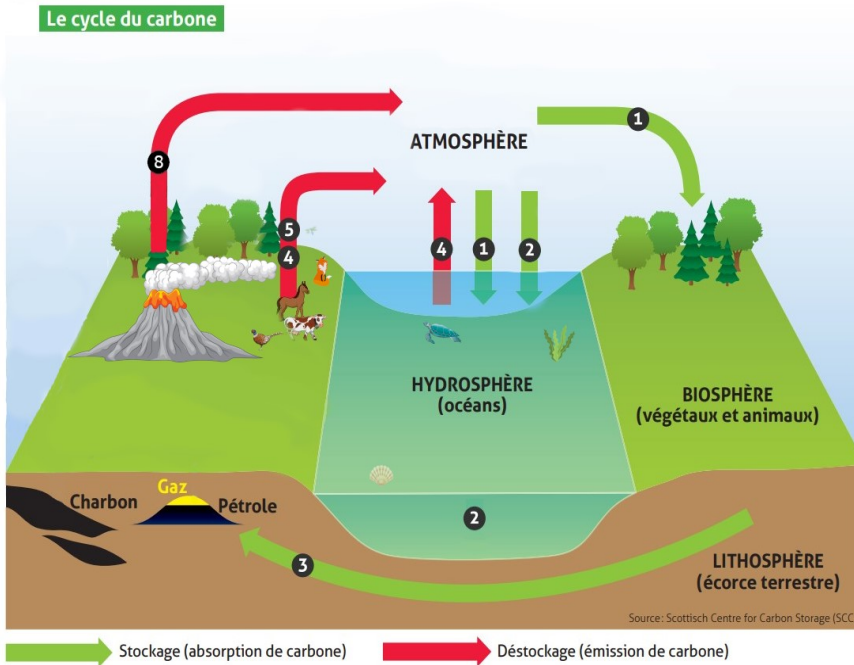
#### 7.3.1 Le principe de greffe pour étudier le fonctionnement du système didactique

Schubauer-Leoni et Leutenegger (2002) proposent d'insérer un élément étranger au système didactique dans le but de le faire réagir. Elles estiment en effet que l'élément perturbateur du fonctionnement ordinaire du système permet de faire émerger « les logiques pratiques » à l'œuvre (p. 242). Concrètement, cet élément étranger désigne un objet provenant d'une situation didactique différente qui sera « greffé » dans la situation qui nous intéresse. La métaphore médicale apporte l'idée du caractère bénin d'une telle implantation pour le système didactique, et même le potentiel bénéfique pour le processus d'enseignement-apprentissage. Il s'agit alors d'étudier les conditions d'assimilation ou de

rejet de la greffe par le système, en particulier les modifications apportées par le sujet enseignant pour l'intégrer à sa séquence existante.

### 7.3.2 Notre greffe : le cycle du carbone pour enseigner la transformation chimique

Poursuivant l'objectif d'intégrer le problème du réchauffement climatique à l'enseignement de la chimie au début du secondaire, nous avons exploré dans le chapitre 4 le potentiel codisciplinaire du cycle du carbone (cf. 4.3.5). Ce modèle, habituellement enseigné dans le cadre des disciplines biologie/géographie/SVT — ce que nous confirment les entretiens menés avec les enseignants enseignantes de biologie/SVT —, paraît particulièrement pertinent pour aborder un problème complexe relatif à l'environnement dans le cadre de l'enseignement de la transformation chimique. C'est pourquoi nous proposons aux enseignants et à l'enseignante de physique-chimie avec qui nous travaillons une représentation du cycle du carbone à intégrer à leur séquence ordinaire à propos des transformations chimiques de la matière (Figure 54).



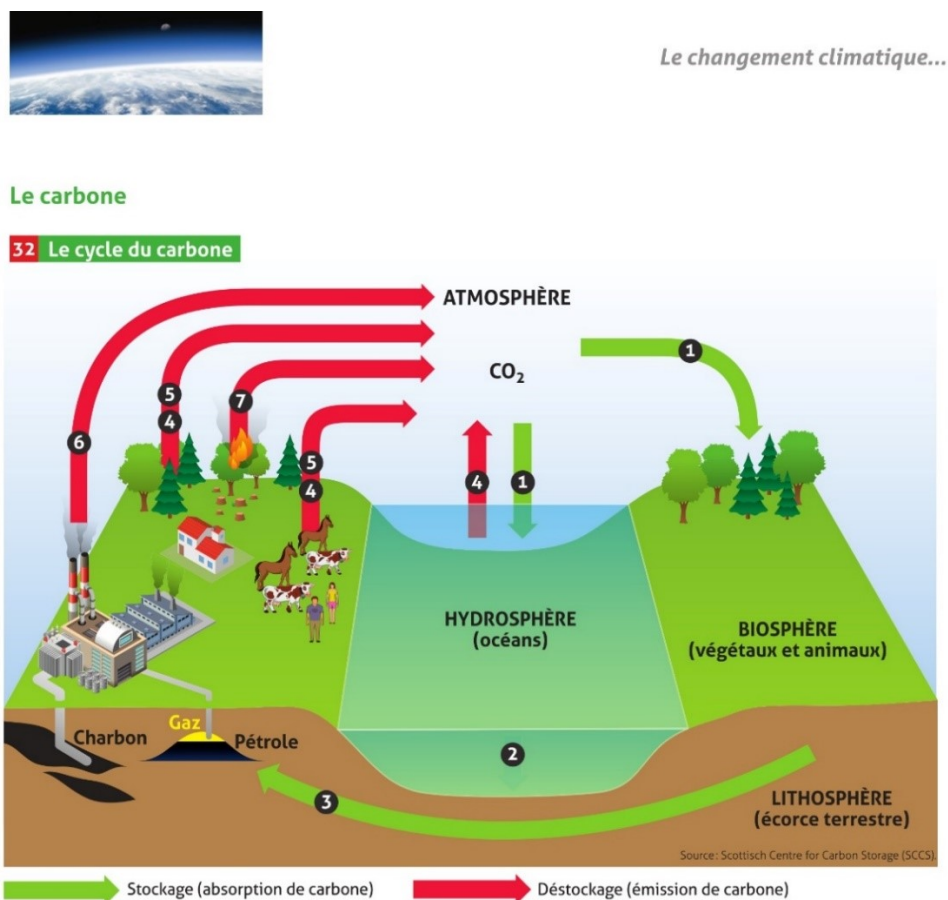
- 1 **Photosynthèse**: les végétaux sur les continents et dans les océans absorbent du  $\text{CO}_2$ . Le carbone participe à la fabrication des tissus végétaux (bois, feuilles, plancton) consommés ensuite par les animaux.
- 2 **Absorption du carbone par les océans**: les océans absorbent de grandes quantités de  $\text{CO}_2$ . Par un processus chimique, celui-ci se dissout dans l'eau, puis entre dans la composition des coquilles et des squelettes d'organismes marins. Une fois morts, ces organismes marins se déposent sur le fond des océans et forment des couches de sédiments.
- 3 **Stockage du carbone dans la lithosphère**: à très long terme, les sédiments forment les roches calcaires. Sous certaines conditions, les restes d'organismes marins et de végétaux peuvent se transformer en combustibles fossiles tels que pétrole, gaz ou charbon.
- 4 **Respiration**: les organismes vivants respirent et rejettent du  $\text{CO}_2$  dans l'atmosphère et l'hydrosphère\*.
- 5 **Décomposition (et fermentation)**: les déchets végétaux et animaux se décomposent et libèrent du  $\text{CO}_2$  et du méthane.
- 6 **Combustion**: l'utilisation des combustibles fossiles (chauffage, transport, industrie) rejette du  $\text{CO}_2$  dans l'atmosphère.
- 7 **Déforestation**: la coupe massive d'arbres a un double effet. D'une part, brûler le bois émet du  $\text{CO}_2$ , d'autre part, diminuer la surface végétale (la biomasse) réduit d'autant la capacité de photosynthèse.
- 8 **Volcanisme**: un volcan en éruption rejette du  $\text{CO}_2$  et de la vapeur d'eau dans l'atmosphère.

**$\text{CO}_2$**   
Le dioxyde de carbone est un des principaux GES. Sources naturelles: respiration des êtres vivants, activité volcanique et feux de forêts. Sources anthropiques: combustion des énergies fossiles (production d'énergie, transports, industrie), agriculture et élevage intensifs, déforestation (combustion du bois).

Figure 54 : représentations du cycle du carbone holocène (gauche) et anthropocène (droite) proposées aux enseignants et à l'enseignante de physique-chimie

### 7.3.2.1 Choix de représentation

La représentation du cycle du carbone que nous proposons est inspirée d'un document issu des Moyens d'enseignement romands de géographie prévus pour la 10<sup>e</sup> année (CIIP, 2010a) (Figure 55).



- 1 **Photosynthèse**: les végétaux sur les continents et dans les océans absorbent du CO<sub>2</sub>. Le carbone participe à la fabrication des tissus végétaux (bois, feuilles, plancton) consommés ensuite par les animaux.
- 2 **Absorption du carbone par les océans**: les océans absorbent de grandes quantités de CO<sub>2</sub>. Par un processus chimique, celui-ci se dissout dans l'eau, puis entre dans la composition des coquilles et des squelettes d'organismes marins. Une fois morts, ces organismes marins se déposent sur le fond des océans et forment des couches de sédiments.
- 3 **Stockage du carbone dans la lithosphère**: à très long terme, les sédiments forment les roches calcaires. Sous certaines conditions, les restes d'organismes marins et de végétaux peuvent se transformer en combustibles fossiles tels que pétrole, gaz ou charbon.
- 4 **Respiration**: les organismes vivants respirent et rejettent du CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère et l'hydrosphère\*.
- 5 **Décomposition (et fermentation)**: les déchets végétaux et animaux se décomposent et libèrent du CO<sub>2</sub> et du méthane.
- 6 **Combustion**: l'utilisation des combustibles fossiles (chauffage, transport, industrie) rejette du CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère.
- 7 **Déforestation**: la coupe massive d'arbres a un double effet. D'une part, brûler le bois émet du CO<sub>2</sub>, d'autre part, diminuer la surface végétale (la biomasse) réduit d'autant la capacité de photosynthèse.
- 8 **Volcanisme (non représenté sur le schéma)**: un volcan en éruption rejette du CO<sub>2</sub> et de la vapeur d'eau dans l'atmosphère.

**CO<sub>2</sub>**  
Le dioxyde de carbone est un des principaux GES. Sources naturelles: respiration des êtres vivants, activité volcanique et feux de forêts. Sources anthropiques: combustion des énergies fossiles (production d'énergie, transports, industrie), agriculture et élevage intensifs, déforestation (combustion du bois).

La compréhension des conséquences des activités anthropiques sur l'équilibre du cycle demande selon nous de représenter le rapport humain-nature dans une vision dualiste (cf. 4.3.1.1.2). C'est pourquoi nous distinguons un cycle du carbone « holocène » exempt de toute activité industrielle, d'un cycle du carbone « anthropocène » où l'être humain industrialisé apparaît. Ce choix de représentation constitue un levier expérimental. Nous considérons en effet que la comparaison des deux cycles peut faire émerger le problème de l'anthropocène dans la classe.

Il est vrai qu'une telle représentation propose une vision très « occidento-centrée » de l'espèce humaine, occultant les sociétés qui vivent en dehors de tout système capitaliste et qui contribuent au cycle du carbone holocène à travers la respiration et la décomposition de la matière organique. Celles-ci pourraient (devraient ?) ainsi être représentées sur le cycle à ce titre, en accord avec la vision moniste de la nature qui les caractérise. Aussi, la différence entre les sociétés primitives (au sens de Lévi-Strauss, 2011) et les sociétés industrielles repose notamment sur le fait que ces dernières sont fondées sur des régimes de production capitalistes. Cette dimension politico-économique qui sous-tend les représentations du cycle du carbone peut être discutée au moment de sa présentation aux élèves.

De plus, considérant la dualité macroscopique-microscopique des formules chimiques et l'ambiguïté de la formule « CO<sub>2</sub> » dans le langage courant (cf. 2.2), nous choisissons de ne pas la faire apparaître au centre du cycle du carbone.

Enfin, il nous semble important de figurer les espèces animales sauvages au même titre que les espèces domestiques, en particulier dans le cycle du carbone holocène. Dans le prolongement de la distinction sociétés humaines primitives et industrielles, les animaux ne contribuent pas aux émissions/productions de carbone au même titre selon s'ils sont sauvages ou domestiques. À l'appui des travaux de Dell'Angelo-Sauvage (2008) et de Franc (2012), nous sommes attentive à la représentation d'une certaine forme de diversité des espèces en ajoutant aussi bien des insectes que des vertébrés (mammifères, reptiles ou oiseaux), espèces terrestres ou aquatiques.

#### 7.3.2.2 *L'implantation de la greffe*

À l'issue de la phase d'observation des pratiques ordinaires (phase 1), nous convenons avec les enseignants et l'enseignante de leur rendre compte de nos observations au cours d'un entretien ultérieur et d'éventuellement envisager une seconde année de collaboration. Quelques semaines avant la rentrée scolaire, nous reprenons donc contact avec chacun et chacune en sollicitant un rendez-vous. Pour des raisons de disponibilité, cet entretien se déroule parfois au sein de leur établissement scolaire, parfois en visioconférence avec l'aide du logiciel *Zoom* (Yuan, 2024).

Nous commençons toujours l'entretien en remerciant l'enseignant ou l'enseignante pour son implication dans notre projet de thèse. Puis, nous revenons sur les observations réalisées l'année précédente, sur l'importance de ces données pour l'avancée du projet. Enfin, nous présentons succinctement nos premiers résultats, en particulier la présence implicite de la transformation chimique dans le cycle du carbone abordé en biologie/géographie en Suisse romande, SVT en France. Nous décrivons le cycle du carbone comme une « proposition » qui pourrait permettre de faire le lien entre transformation chimique et questions environnementales, en rappelant que c'est l'un des enjeux du PER/programme. Pour illustrer notre proposition, nous présentons la représentation du cycle du carbone que nous avons pensée à partir des MER de géographie, en commençant par sa version « holocène », puis la version « anthropocène » (Figure 54). Nous pointons différentes flèches, notamment « combustion »,

« photosynthèse » et « respiration » en explicitant les réactions chimiques qui nous permettent d’interpréter ces changements de substance, ainsi que les substances impliquées. Enfin, nous évoquons le principe de conservation, en particulier la conservation de l’élément carbone, présent dans tous les compartiments du cycle sous différentes formes (charbon, pétrole, dioxyde de carbone, sucres, etc.). En mettant les deux versions du cycle du carbone en perspective, nous faisons remarquer que la comparaison de ces deux représentations permet de mettre en évidence le rôle des activités industrielles dans l’accumulation de gaz dioxyde de carbone dans l’atmosphère et donc d’aborder le problème de l’anthropocène avec les élèves. Après la présentation de notre « proposition », nous laissons la parole à l’enseignant ou l’enseignante, en commençant par lui demander s’il lui semble possible de l’intégrer à sa séquence sur les transformations chimiques. La suite de l’entretien consiste en une discussion sur les modalités de mise-en-œuvre de notre proposition au sein de la séquence ordinaire. Notre posture est plutôt accompagnante. Nous formulons à plusieurs reprises être disponibles pour aider à la construction de la nouvelle séquence — pour la recherche de documents ou autres ressources notamment. Nous manifestons notre souci de ne pas provoquer de changements trop coûteux dans la progression ordinaire. À l’issue de l’entretien, nous nous tenons à disposition pour discuter de la nouvelle séquence intégrant le cycle du carbone avant sa mise en œuvre en classe. Nous indiquons également être joignables à tout moment par courriel ou par téléphone pour répondre à d’éventuelles questions. Tous et toutes nous solliciteront pour un second entretien visant à discuter de leurs choix pour l’articulation du cycle du carbone à leur séquence ordinaire. Pour les raisons pratiques évoquées précédemment, ces entretiens sont organisés à la demande des enseignants et de l’enseignante dans leur établissement scolaire ou dans les locaux du laboratoire de recherche (LIRDEF, Montpellier).

L’observation de l’implantation du cycle du carbone dans les séquences ordinaires constitue la seconde phase de notre dispositif de recueil de données (phase 2).

#### 7.4 Bilan du dispositif de recueil des données

Notre dispositif de recueil de données prévoit donc deux phases organisées sur deux années consécutives. Nous travaillons avec une enseignante et trois enseignants de physique-chimie du secondaire I, deux dans le canton de Genève en Suisse (Nino et Henri), deux dans l’académie de Montpellier en France (Aurélié et Gauthier). Pour nous adapter à la programmation de ces quatre enseignants et enseignante, et organiser le recueil de données dans des établissements scolaires séparés par près de cinq cents kilomètres, la durée de recueil s’étend sur sept trimestres, entre septembre 2020 et mars 2023 (Figure 56).

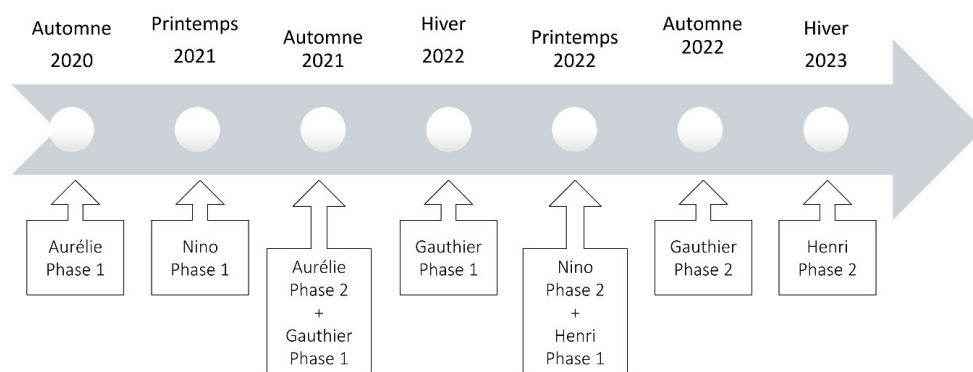


Figure 56 : organisation du dispositif de recueil de données dans le temps

Chaque phase correspond à une boucle d'observables : entretiens *ante*, observations, entretiens *post* (cf. 7.1). Puisque la greffe que nous proposons — le cycle du carbone — fait fonction d'objet-relais (cf. 4.3.3) entre les disciplines chimie et biologie/géographie/SVT, nous recueillons également le discours des collègues des enseignants et enseignantes de chimie qui ont la charge des mêmes élèves pour l'enseignement de la biologie/géologie (Figure 57). Ces données constituent des traces externes à la classe de chimie, mais qui, recoupées avec les données récoltées dans cette dernière, peuvent apporter des clarifications sur les actions et les discours des élèves.

Suisse (Canton de Genève)		France (Académie de Montpellier)	
<i>Année 1 : Phase 1</i>			
<b>Classe de physique-chimie</b>	<b>Classe de biologie</b>	<b>Classe de physique-chimie</b>	<b>Classe de SVT</b>
entretien <i>ante</i> Ens	entretien Ens	entretien <i>ante</i> Ens	entretien Ens
observation pratiques ordinaires		observation pratiques ordinaires	
entretiens <i>post</i> Ens + entretiens <i>post</i> éls		entretiens <i>post</i> Ens + entretiens <i>post</i> éls	
<i>Année 2 : Phase 2</i>			
<b>Classe de physique-chimie</b>		<b>Classe de physique-chimie</b>	
entretiens d'accompagnement Ens		entretiens d'accompagnement Ens	
observations mise en place de la greffe		observations mise en place de la greffe	
entretiens <i>post</i> Ens + entretiens <i>post</i> éls		entretiens <i>post</i> Ens + entretiens <i>post</i> éls	

Figure 57 : organisation des dispositifs de recueil de données entre la France et la Suisse romande

L'ensemble des traces internes et externes collectées au cours des phases 1 : observations des pratiques ordinaires, et 2 : implantation d'une greffe dans le système didactique, nous apportent un certain nombre d'indices à propos des mécanismes de transposition de la transformation chimique dans la perspective de compréhension d'un problème environnemental — l'anthropocène. Dans le chapitre suivant, nous allons exposer les outils mis en œuvre pour l'analyse du corpus ainsi constitué, outils nécessaires pour transformer les traces en signes et reconstruire les logiques des actions observées.

## CHAPITRE 8 — OUTILS D'ANALYSE DES DONNÉES

Dans ce chapitre, nous présentons les outils nous permettant de transformer les traces récoltées au moyen d'observations vidéos en classe en signes du fonctionnement du système didactique « classe de chimie ». Nous convoquons des outils élaborés pour l'analyse de l'action conjointe en didactique, que nous avons présentés dans le chapitre 5 (cf. 5.5). Nous complétons le triplet, mésogenèse, topogenèse, chronogenèse, par des outils d'analyse des niveaux de détermination didactique : analyse des systèmes sémiotiques en chimie selon Kermen (2022), étude du rapport au savoir de l'enseignant ou de l'enseignante, et notion de configurations didactiques au sens de Simonneaux (2011). En guise de bilan, ce chapitre s'achève sur un schéma représentant la méthodologie de recueil et d'analyse des données que nous élaborons.

### 8.1 Analyser des données vidéos pour l'étude de l'action conjointe

#### 8.1.1 Trois échelles d'analyse

À l'instar de Ligozat (2008) ; Marty (2019) ; Tiberghien et al. (2008) ; Tiberghien et Sensevy (2012), nous considérons trois échelles d'analyses. Tiberghien et Sensevy (2012) décrivent en effet trois niveaux pour l'analyse des données vidéos : 1) l'échelle macro permet d'observer l'intégralité de la séquence à gros grains, 2) l'échelle méso dépend de l'objet de recherche et se focalise sur les événements jugés comme significatifs de la situation observée, 3) l'échelle micro se concentre sur des interactions précises entre les sujets.

En ce qui concerne notre étude, l'échelle macro est définie par la durée maximale de la séquence observée pour chaque phase (année 1 puis année 2). Par exemple, l'échelle macro couvre une durée minimale de trois séances d'une heure et demie chez Nino en phase 1 — soient trois semaines d'enseignement —, jusqu'à dix séances de cinquante-cinq minutes chez Gauthier en phase 2 — soient sept semaines d'enseignement (Figure 58).

	Suisse (Canton de Genève)		France (Académie de Montpellier)	
	Nino	Henri	Aurélie	Gauthier
Phase 1	3 séances (1h30) 3 semaines	5 séances (1h30) 5 semaines	4 séances (55 min) 3 semaines	<i>Boucle 1:</i> 5 séances (55 min) 3 semaines + <i>Boucle 2:</i> 7 séances (55 min) 6 semaines
Phase 2	3 séances (1h30) 3 semaines	5 séances (1h30) 5 semaines	5 séances (55 min) 5 semaines	10 séances (55 min) 7 semaines

Figure 58 : empan de l'échelle macroscopique et nombre de séances par séquence pour chaque sujet enseignant

L'analyse à l'échelle macro nous renseigne sur l'enjeu principal d'apprentissage (N+1) visé par le sujet enseignant à travers la séquence et son déploiement en enjeux de niveau N, organisés dans les différentes séances.

L'échelle mésoscopique correspond alors à des moments pouvant regrouper plusieurs enjeux de sous-niveaux (N-1), eux-mêmes découpés en phases de l'action, en fonction des étapes élaborées pour arriver à l'enjeu visé. Enfin, l'analyse microscopique s'intéresse à des interactions très courtes, de l'ordre de quelques tours de paroles (plusieurs secondes à quelques minutes) (Figure 59).

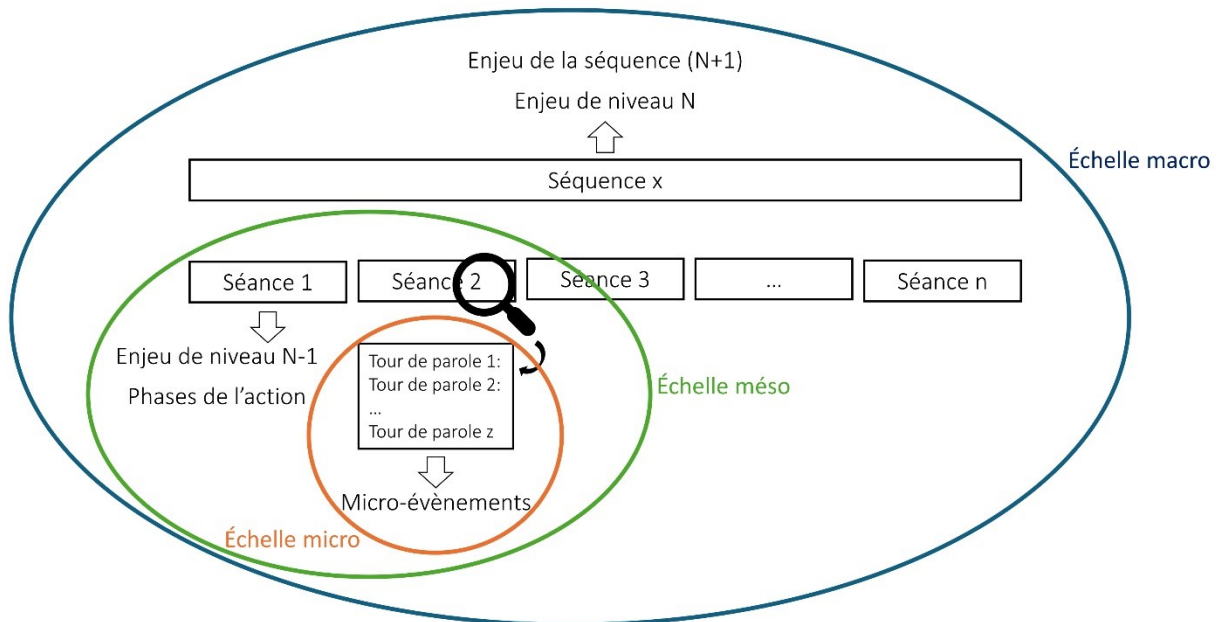


Figure 59 : emboîtement des trois échelles d'analyses

En effet, les trois échelles d'analyse reposent sur deux étapes de *réduction de l'information* présente dans les données vidéos : la transcription des séances enregistrées et la construction de synopsis.

## 8.1.2 Réduction de l'information

### 8.1.2.1 Transcription

La réduction de l'information consiste premièrement en la construction de *protocoles d'interactions* à partir de la transcription du discours des sujets ainsi que de certains gestes jugés significatifs et donc nécessaires à la compréhension de leurs actions. Ces derniers peuvent être transcrits par quelques mots de description qui figurent au milieu du discours, en italique et entre parenthèses (Figure 60), ou illustrés par une capture d'écran réalisée sur la vidéo au moment où le geste apparaît (Figure 61).

- 8) El-Al?: un produit,
- 9) Ens: (*acquiesce*) un produit, un ou plusieurs alors des fois donc là je vous prends des modèles moléculaires que j'ai heu c'que je vous montre c'est pas du tout la réalité dans le sens où ces espèces-là ne réagissent pas exactement comme je vais vous montrer mais c'est juste pour que vous compreniez le principe, donc là vous voyez ces modèles moléculaires là (*montre des boules de couleurs qui servent à modéliser les atomes et qui peuvent s'assembler pour modéliser des molécules*) vous avez eu l'habitude de les travailler sur l'ordinateur (*fait réf à la séance introductive sur le modèle moléculaire qui est réalisée sous forme de TP informatique*) d'accord on va avoir l'atome d'oxygène qu'on représente par une bille rouge les atomes d'hydrogène qu'on représente par des billes blanches et puis l'atome de carbone qu'on représente par une bille noire, alors ça vous vous rappelez c'est le TP qu'on a fait d'ailleurs je vous donnerai vos notes / donc imaginons ça c'est deux réactifs qui réagissent ensemble (*molécule de dioxyde de carbone d'un côté dihydrogène de l'autre*) donc je les mets en contact vous clairement en manipulant ça peut être par exemple deux liquides qu'on met ensemble etc on verra tout à l'heure ce que vous avez fait vous comme transformation chimique et puis heu
- ▣ (0:05:05.0) ça peut par exemple former un seul produit ce que tu m'as dit un produit (*montre une nouvelle molécule composée de toutes les billes en main deux rouges une noire et deux blanches*) mais ça peut aussi donc là vous voyez c'est une nouvelle molécule ça c'est pas du tout ce que j'avais à la base, elle n'existe pas hein je vous fais n'importe quoi mais c'est juste pour que vous compreniez,

Figure 60 : extrait d'une transcription (Aurélié — phase 1 — séance 2)

41) Ens : il a tout mis ensemble il ferme bien bien bien la bouteille >15'' et la valeur de la masse (*pointe l'image au tableau*)



90 91 toujours >10'' est-ce que la masse change au cours de la transformation chimique

Figure 61 : extrait d'une transcription illustrée par une capture d'écran (Aurélié — phase 1 — séance 3)

Décider de transcrire ou non un geste est à l'appréciation de la chercheuse et dépend de la question de recherche posée. De même que certains discours jugés comme non pertinents pour la compréhension de la situation didactique (des moments de gestion de la discipline en particulier) ne sont pas transcrits *in extenso* mais pourront faire l'objet d'une mention en italique et entre parenthèses : « (*discipline*) ».

Nous voyons sur l'extrait présenté dans la Figure 60 que des précisions peuvent également être apportées pour soulever un implicite dans le discours. Par exemple, au cours de la séance 2, Aurélie fait référence aux modèles moléculaires manipulés par les élèves au cours d'une activité informatique qui a eu lieu avant le début de la séquence. Ce sont des éléments de contexte qu'elle nous a communiqués au cours de l'entretien *ante* et qui figurent dans ses documents de préparation de la séquence (traces externes). Ces éléments permettent d'explicitier le discours produit dans la situation observée (trace interne) : « vous avez eu l'habitude de les travailler sur l'ordinateur ». Éclairé par les informations issues de traces externes, le protocole d'interactions rend compte de l'action des sujets en situation et sert donc de base pour les analyses. Afin de transcrire le discours de façon authentique, nous utilisons certaines normes de rédaction censées prévenir la tentation de l'interprétation, que nous réservons à l'étape d'analyses. Pour cela, nous nous inspirons notamment des normes de transcription du logiciel *Transana* (Woods, 2019) (cf. annexe 13), outil avec lequel nous réalisons nos transcriptions.

Premièrement, nous n'utilisons pas de ponctuation dans notre transcription du discours<sup>83</sup>, mais signifions les modifications de l'intonation par une flèche montante (↑) ou descendante (↓). En effet, la grammaire voudrait que nous utilisions un point d'interrogation pour signifier l'intonation montante à la fin d'une phrase interrogative. Toutefois, la transcription comme outil de réduction de l'information ne consiste pas en un exercice de style. Nous ne pouvons que transcrire rigoureusement ce que nous entendons — une intonation montante — sans attribuer à son autrice l'intention de poser une question.

La recherche d'une transcription authentique du discours demande également de mettre en évidence la variable temps. Ceci est mis en œuvre par une indication systématique du temps au sein de la transcription. Toutes les minutes, une balise temporelle est insérée dans le texte, de sorte que nous puissions nous rendre compte des interactions ayant lieu au cours de chaque minute de l'extrait (en rouge et bleu sur la Figure 60). Au niveau du discours, nous utilisons des barres obliques pour signifier des pauses de durées variables : (/) pour une pause d'une seconde correspondant à la reprise de la respiration ; (//) pour une pause de deux à trois secondes ; (///) pour une pause de trois à cinq secondes. Si le discours est interrompu au-delà de cinq secondes, nous indiquons directement le temps de silence par sa durée, précédée du symbole « > ». Par exemple, sur la Figure 61, une pause de quinze secondes dans le discours de l'enseignante est indiquée ainsi : « >15" ».

Enfin, nous essayons, dans la mesure du possible, de ne pas faire d'inférence à partir de ce que nous entendons et de transcrire rigoureusement les propos des sujets. Cela suppose parfois de rapporter des mots tronqués, une syllabe restée en suspens, car interrompue par une autre intervention, des erreurs de prononciations et même de signifier que le discours est incompréhensible ou inaudible, respectivement par les symboles « (XXX) » et « (*inaud*) ».

Toutes les séances de classe observées sont transcrites de cette manière, ainsi que les entretiens *ante*- et *post*-observations. Les protocoles d'interactions des séances servent d'appui pour l'élaboration des synopsis.

---

<sup>83</sup> Nous utilisons seulement le point d'interrogation à côté de l'abréviation du nom des sujets quand nous ne sommes pas certaine d'identifier la personne qui parle pour nous souvenir de considérer avec précautions ces informations au moment des analyses.

### 8.1.2.2 Construction des synopsis

La réduction de l'information consiste ensuite à produire une « vision synoptique » de la séquence, expression empruntée à Wittgenstein par Sensevy (2013, paragr. 86). Pour cela, nous opérons différents niveaux de découpages de l'action en fonction des enjeux identifiés, organisés dans des tableaux.

À l'échelle macro, le synopsis de séquence rend compte de l'enjeu de la séquence (N+1) et de son découpage en plusieurs enjeux de niveau N, correspondant à des séances différentes (Figure 62).

Synopsis de la séquence – Classe de Nino – Matière et transformations

Enjeux de la séquence (N+1)	Enjeux N
Modélisation de la transformation chimique par les réactions chimiques et étude des concepts associés (équation, réactif, produit)	Etude de la réaction d'électrolyse de l'eau : approche macroscopique puis modélisation microscopique, définition de réaction, réactif et produit <b>N1</b> <i>Séance 1 [31min]</i>
	Etude de la réaction de combustion du butane : application du concept de réaction chimique <b>N2</b> <i>Séance 1 [5min]</i>
	Ecriture et équilibre d'équations de réaction <b>N3</b> <i>Séance 2 [36min]</i>
	Etude expérimentale de réactions de combustions (carbone, butane dihydrogène et fer) : application des concepts de réactifs et produit, écriture de l'équation de réaction et principe de conservation de la masse <b>N4</b> <i>Séances 2 et 3 [1h51]</i>
	Retour sur la combustion incomplète du méthane : prévention de l'intoxication au monoxyde de carbone <b>N5</b> <i>Séance 3 [8min20]</i>

Figure 62 : exemple de synopsis de séquence chez Nino (phase 1)

Les synopsis de séances proposent des découpages aux échelles d'analyses méso et micro. D'abord par l'identification de sous-enjeux ou tâches de niveau N-1<sup>84</sup>, puis l'organisation de ces sous-enjeux en différentes phases de l'action, c'est-à-dire en identifiant les étapes qui permettent d'atteindre l'enjeu en question et structurent donc l'action (échelle méso). Enfin, à l'échelle micro, nous identifions les micro-événements liés aux objets qui rendent compte de significations émergentes chez les élèves ou chez le sujet enseignant, indices de la co-construction de la référence (Figure 63).

<sup>84</sup> Nous réalisons un découpage en niveaux et sous-niveaux d'enjeux à partir des données que nous avons enregistrées et de nos questions de recherches. Le nombre de niveaux de découpage peut varier selon ces paramètres.

Classe de Nino - 11 <sup>ème</sup> LS - séance du 03 juin 2021 Matière et transformations : séance 1			
Enjeux de niveau N (visées de l'ENS qui oriente l'action globalement)	Enjeux/tâches de niveau N-1	Phases de l'action (étapes ou organisation pour atteindre l'enjeu)	Micro-Evénements liés aux objets (significations émergentes du côté de Ens ou éls)
Etude de la réaction d'électrolyse de l'eau : approche macroscopique puis modélisation microscopique, définition de réaction, réactif et produit, transformation chimique N1 [31min]	Rappels N11 [04 :52 à 06 :54/ TdP 1 à 3]	Présentation du programme de la séance N11a [04 :52 à 06 :18 / TdP 1 à 3]	Ens TdP3 : alors j'vous donne rapidement le programme du cours / j'aimerais faire une première approche donc ça va être assez peu de temps que que les 40 minutes qui nous restent hum sur les heu transformations chimiques / la semaine prochaine y a aura davantage de manipulations promis là aujourd'hui c'est plutôt cours plutôt démonstratif
		Rappels transformation physique N11b [06 :18 à 06 :54 / TdP 3]	Ens TdP3 : l'exemple de la transformation physique c'est les changements d'état de l'eau d'accord / dans le cadre d'une transformation physique / on change pas les molécules c'est à dire que vous avez les mêmes molécules avant et après d'accord donc cet exemple là l'exemple de l'eau c'est toujours de l'eau (pointe au tableau une représentation des changements d'état de l'eau) solide liquide et gazeux mais c'est toujours de l'eau, d'accord la pour vous votre truc mnémotechnique ce sera de dire ben dans le cas des transformations physiques on peut assez facilement revenir en arrière
	Etude macroscopique de la réaction d'électrolyse de l'eau N12 [06 :54 à 20 :34/ TdP 3 à 131]	Présentation du dispositif expérimental : la cuve à hydrolyse N12a [06 :54 à 09 :15 / TdP 3 à 17]	Ens TdP3 : alors ce système heu vous avez heu trois tours / vous partez du principe qu'à l'intérieur c'est de l'eau / par honnêteté scientifique je peux vous dire que c'est pas tout à fait vrai, en fait vous avez de l'eau et puis on a rajouté de l'acide sulfurique avec d'accord vous avez ici en fait deux électrodes (pointe le bas du montage) et sur ces deux électrodes et puis entre ces deux électrodes électrodes XX (indistinct) peu importe j'vais faire passer un courant électrique / ok et vous allez regarder un petit peu c'qui s'passe ⇒ Ens allume le courant électrique

Figure 63 : extrait de synopsis de séance chez Nino (phase 1 — séance 1)

L'organisation du synopsis dans un tableau permet selon Tiberghien et Sensevy (2012) ; Sensevy (2013), non seulement de sélectionner les extraits d'observations à fort potentiel pour l'analyse, mais aussi de mettre en perspective des actions séparées dans le temps. Ainsi, grâce à une structure qui concilie continuité temporelle et emboîtement des niveaux de découpages, le synopsis de séance permet de réduire l'information extensive présente dans les données vidéos en fonction de l'axe de recherche choisi, tout en reconstruisant la continuité des actions observées. Conclusion de l'étape de réduction de l'information, les synopsis sont une voie d'entrée pour l'analyse de l'action conjointe. En effet, selon Marty (2019), les différentes échelles d'analyse nous donnent accès à différents grains de l'évolution du contrat didactique et de sa relation avec le milieu. La mise en relation des trois échelles d'analyse est alors nécessaire pour comprendre la logique des pratiques de classes et pour identifier les extraits significatifs de la construction des objets de savoirs étudiés dans la situation.

### 8.1.3 Une analyse ascendante de la transposition didactique

#### 8.1.3.1 Articulation des programmes épistémologique et didactique

Selon Schubauer-Leoni et Leutenegger (2005), analyser l'action didactique conjointe consiste à articuler programme épistémologique et programme didactique. En effet, cette méthodologie d'étude procède selon une lecture ascendante de la transposition didactique, en mettant en perspective « l'agir effectif de sujets précipités dans les pratiques institutionnelles » (p. 418) avec une analyse du savoir rencontré dans le cadre de cette institution. Dès lors, sur le plan méthodologique, l'analyse des observations de séances de classes doit s'accompagner d'une analyse a priori du savoir dont il est question dans ces situations, que nous évoquons dans le chapitre précédent. Selon Mercier (2008), comprendre le savoir rencontré par les élèves permet de mieux interpréter leurs actions en situation. Pour Schubauer-Leoni et

Leutenegger (2002), elle permet également de préparer le dispositif d'observation des pratiques, en anticipant les modalités de mise en œuvre des tâches prévues.

Concrètement, l'analyse a priori consiste en une analyse épistémologique du savoir en jeu qui tient compte des possibles et des obstacles pour les sujets du système. Ainsi, nous étudions les caractéristiques épistémologiques des modèles de la réaction chimique et du cycle du carbone (cf. Chapitre 2 et Chapitre 4). Il s'agit ensuite d'envisager pour chaque terrain d'étude ce que les situations élaborées par l'enseignant ou l'enseignante permettent d'apprendre, quelles sont les responsabilités confiées aux élèves, quelles difficultés pourraient être rencontrées, etc. Comme son nom l'indique, l'analyse a priori est réalisée avant les observations en classe, sur la base de l'entretien *ante* avec le sujet enseignant et de ses documents de préparation. On se place alors transitoirement dans une analyse descendante de la transposition didactique, en anticipant le savoir enseigné à partir du savoir à enseigner (Schubauer-Leoni & Leutenegger, 2005). L'étude du programme didactique par le triplet de genèses provoque le retour à l'analyse ascendante en réalisant le processus inverse.

#### 8.1.3.2 Analyse de l'action conjointe

Les outils d'analyse de la relation contrat didactique-milieu, mésogenèse, topogenèse et chronogenèse, sont appliqués sur des extraits considérés comme significatifs pour le processus de transposition didactique observé. Ces extraits sont choisis à partir des synopsis de séances, en fonction des micro-événements repérés dans la dernière colonne, relatifs aux objets présents dans le milieu et en regard de nos questions de recherche. Nous sommes particulièrement attentive aux *traits pertinents* apportés par les élèves dans le milieu, en tant que témoins de la production de significations, c'est-à-dire d'une co-construction de la référence (cf. 5.5). Par exemple, nous considérons comme trait pertinent l'introduction d'un objet (matériel ou conceptuel) dans le milieu qui aide l'avancée du savoir enjeu de la séance. Un trait pertinent peut aussi consister en la reconnaissance et « traduction » par un ou une élève d'un objet inconnu pour ses pairs, en appui sur la référence commune.

Une telle méthodologie de collection des événements, puis d'analyse de la relation contrat didactique-milieu à travers la liaison théorique des événements entre eux permet selon Schubauer-Leoni et Leutenegger (2002) d'« expliquer/comprendre l'économie de fonctionnement du système didactique » (p. 240).

Nous l'avons décrit dans le chapitre 5, l'action didactique dépend d'un certain nombre de déterminants. C'est pourquoi nous complétons l'étude de l'action *in situ* par une analyse sémiotique et par l'étude du rapport au savoir des sujets enseignants, ainsi que par une discussion à la lumière de la notion de configurations didactiques.

#### 8.1.4 Outils complémentaires pour l'étude des traces

##### 8.1.4.1 Analyse sémiotique

Étant donné les spécificités du langage de la chimie et l'étroite relation que ce langage spécifique entretient aux concepts de la discipline (Jaubert, 2007) (cf. 2.2), l'analyse sémiotique du discours des sujets de l'institution « classe de chimie » nous semble indispensable. Pour la mettre en œuvre, nous reprenons la proposition de Kermen (2022) de considérer une double relation sémiotique — macroscopique et microscopique — pour les formules et les noms chimiques. À l'appui de la sémiotique de Peirce, cette autrice identifie dans le cadre de la chimie deux objets et deux interprétations distinctes pour un même signe (Figure 64).

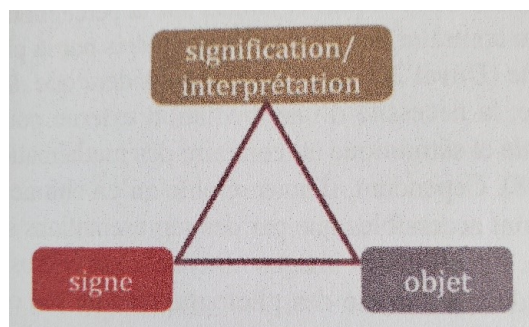


Figure 64 : relation sémiotique triadique, d'après Kermen (2022, p. 58)

Il s'agit quant à nous d'observer les conditions de navigation des sujets entre ces deux niveaux sémiotiques, en faisant l'hypothèse qu'ils nous renseignent sur la maîtrise des concepts associés par les élèves. À l'instar de Kermen (2018), nous sommes donc attentive à l'articulation de ces niveaux du modèle dans le discours des sujets, mais suivant le schéma de la modélisation des transformations chimiques au secondaire I que nous avons élaboré au terme du chapitre 2 (Figure 65), nous cherchons également les moments d'interprétations de la réalité idéalisée par le modèle microscopique.

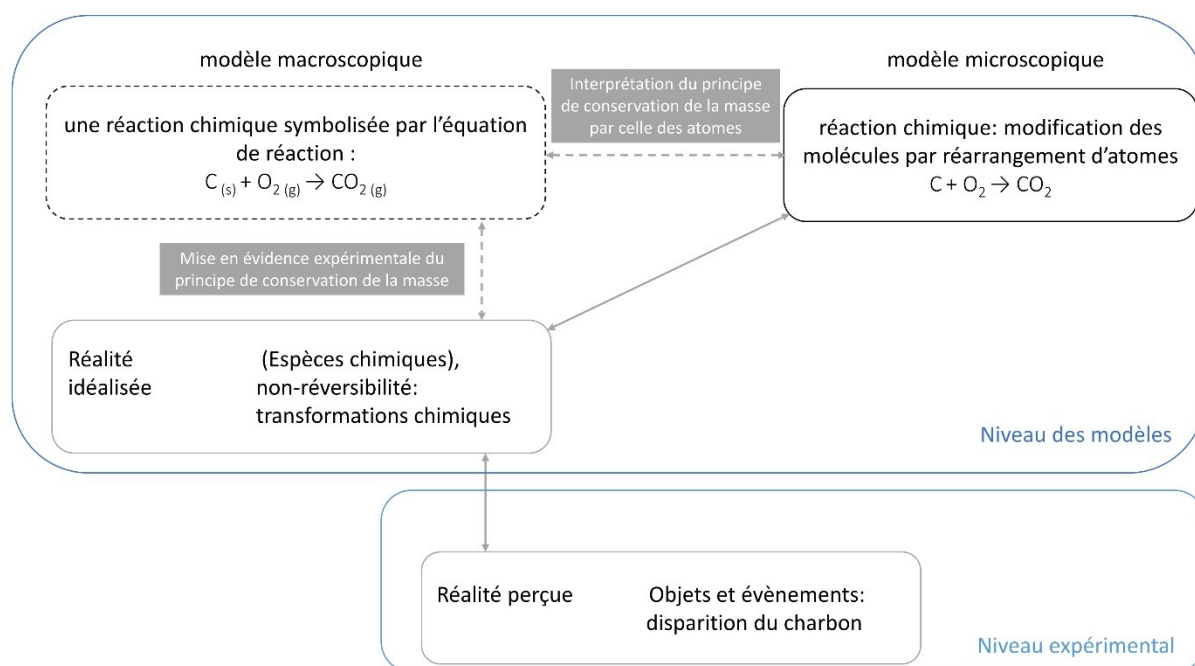


Figure 65 : schéma de la modélisation de la transformation chimique au secondaire I

Cependant, nous ne cherchons pas à identifier de façon systématique les moments où les sujets enseignants et apprenants feraient un usage approprié (ou non) du niveau du modèle désigné par le langage. Nous cherchons plutôt à repérer quels indices dans la situation, dans les régulations de l'enseignant ou l'enseignante, guident les élèves dans l'appropriation du langage spécifique à plusieurs niveaux (réalité perçue, réalité idéalisée, modèle macroscopique, modèle microscopique).

Aussi, puisque notre travail s'intéresse à l'intégration d'un problème environnemental à l'enseignement de la chimie à travers le cycle du carbone, la question des registres quotidiens et scientifiques doit être considérée. En effet, nous savons que certains modèles empruntés à la chimie se retrouvent dans le débat public dès lors qu'il est question des conséquences des activités anthropiques sur l'environnement. C'est

le cas du « CO<sub>2</sub> », emblème des gaz à effet de serre (cf. 4.3). Nous ne pouvons donc ignorer le registre « quotidien » du langage associé à cet objet, ainsi que les modèles sur lesquels il repose (la pollution par exemple). En nous appuyant sur la théorie des deux mondes de Tiberghien et Vince (2005), nous considérons le processus de modélisation comme une dialectique entre monde des objets et des événements, monde des théories et des modèles, eux-mêmes dissociés entre la vie quotidienne et la pratique scientifique (Figure 66).

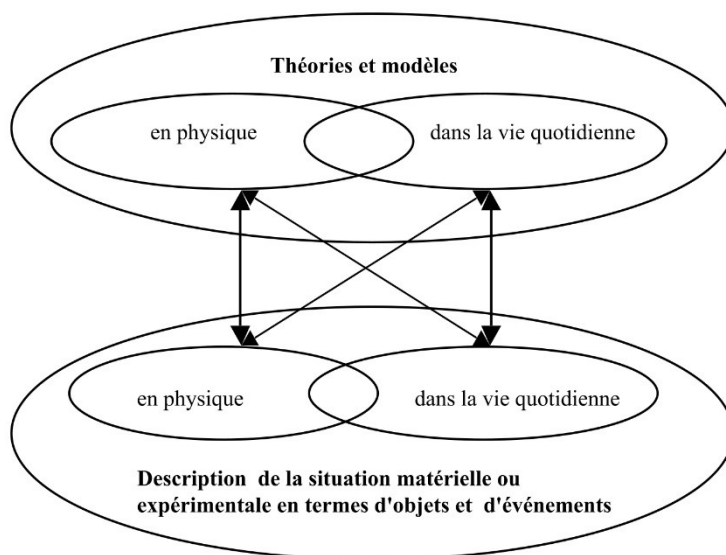


Figure 66 : théorie des deux mondes de Tiberghien et Vince (2005, p. 6)

Ainsi, nous sommes attentive à l'utilisation des certaines expressions dans le contexte de la classe de chimie qui relèvent plutôt d'un modèle quotidien. Par exemple, à propos des usines ou des voitures représentées sur le cycle du carbone, dire « Les usines/les voitures sont mauvaises pour l'environnement, car elles polluent » relève plutôt d'une modélisation quotidienne des problèmes environnementaux. La formulation de cette idée à l'appui des modèles scientifiques pourrait être : « Les centrales à charbon/les moteurs des voitures à essence mettent en jeu des combustions, réactions chimiques qui produisent du dioxyde de carbone. Le dioxyde de carbone est un gaz à effet de serre qui contribue au réchauffement de l'atmosphère, son accumulation provoque donc l'augmentation de la température terrestre et par conséquent le déséquilibre des écosystèmes ».

Un tel raisonnement repose sur la considération d'une certaine correspondance entre discours des sujets et processus de conceptualisation, notamment décrite par Vygotski (2019) et reprise dans certains courants de recherches en didactique : la théorie des champs conceptuels développée par Vergnaud (1990, 1991) ou encore l'axe « Langage et apprentissages disciplinaires » développé par Martine Jaubert et Maryse Rebière au sein du laboratoire *Épistémologie et didactiques des disciplines* à Bordeaux (Jaubert, 2007; Jaubert & Rebière, 2000; Rebière & Jaubert, 2009). Nous nous inscrivons dans ce mouvement.

#### 8.1.4.2 Analyse du rapport au savoir des sujets enseignants

Afin de reconstruire le rapport au savoir des sujets enseignants, nous réalisons une analyse de leurs discours en entretiens à la lumière de leurs pratiques en classe.

En effet, si les entretiens semi-dirigés *ante-* et *post-*observations nous permettent de les interroger précisément à propos des enjeux qu'elle et ils associent aux objets de savoir et d'ainsi reconstruire leur positionnement vis-à-vis de ces objets, nous n'oublions pas que de tels entretiens sont menés sous l'influence du contrat de recherche. Aussi, pour nuancer certains biais de désidérabilité (ou effets de contrat) liés à ce contrat de recherche, nous mettons en perspective le discours et des exemples pertinents de leurs pratiques issus de la séquence dont il est question en entretien. Une telle comparaison nous permet de dessiner la dimension identitaire du rapport au savoir, en particulier à travers la façon dont l'enseignant ou l'enseignante se positionne vis-à-vis de l'objet à travers le langage et à travers ses actions. L'étude des pratiques nous donne quant à elle accès à la dimension épistémologique du rapport au savoir, notamment à travers l'étude des tâches pensées pour la mise en œuvre de transposition didactique interne (cf. 5.6.3).

Enfin, nous envisageons une étude de l'épistémologie pratique si certains indices apparaissent dans les analyses et ne peuvent être interprétés comme des éléments du rapport au savoir.

#### 8.1.4.3 *Inspiration de la notion de configurations didactiques*

Enfin, nous convoquons un dernier outil d'analyse des déterminants de l'action : la notion de configurations didactiques telle que définie par Simonneaux (2011). Nous avons montré dans le chapitre 5 en quoi l'étude de la cohérence de l'articulation entre attribut du savoir, posture épistémologique et stratégie didactique (Figure 67) peut nous renseigner sur le déroulement de l'action *in situ*.

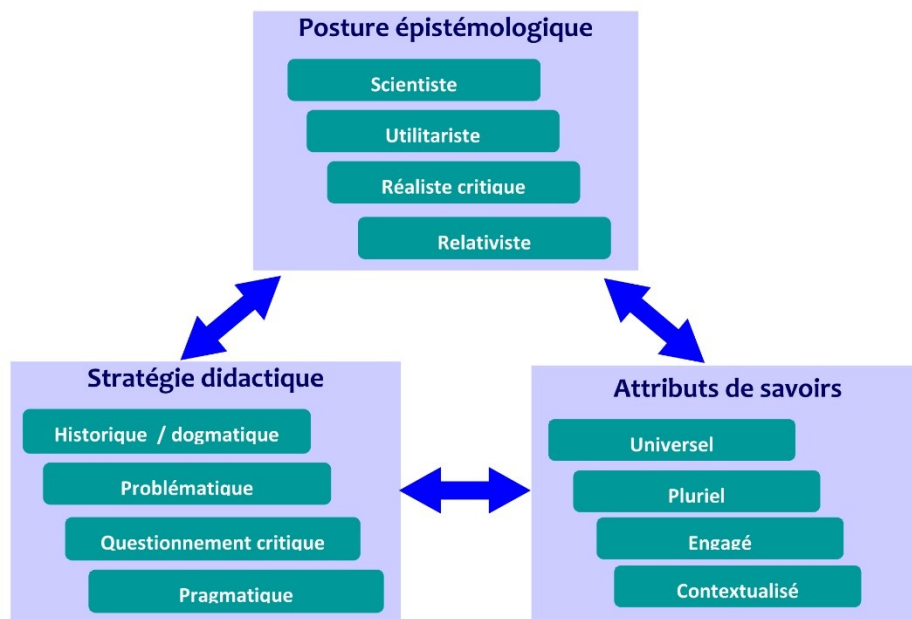


Figure 67 : trois dimensions articulées des configurations didactiques (Simonneaux, 2011, p. 145)

Simonneaux (2011) précise que si les quatre valeurs de chaque dimension combinées produisent soixante-quatre configurations didactiques théoriquement possibles, certaines configurations constituent des modèles archétypaux de l'enseignement des sciences (observés dans les pratiques ordinaires, constitués à partir d'ingénieries didactiques ou modèles théoriques) (Figure 68) :

- La configuration *hiérarchique* articule attribut du savoir universel, posture épistémologique scientifique et stratégie didactique dogmatique.
- La configuration *problématisante* se définit par des savoirs pluriels, une posture réaliste critique et une stratégie didactique problématique.
- La configuration *professionnelle* met en jeu des savoirs contextualisés, une posture épistémologique utilitariste et une stratégie didactique pragmatique.
- La configuration *critique* qui articule savoir engagé, réalisme critique et questionnement critique, est souvent promue pour l'enseignement des QSV.

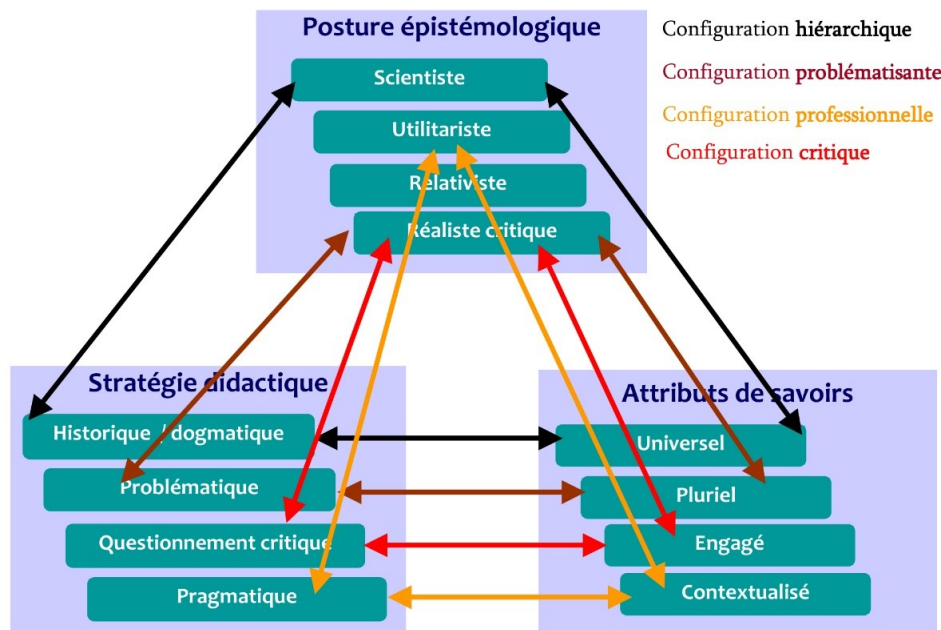


Figure 68 : modèles archétypaux des configurations didactiques (Simonneaux, 2011, p. 148)

Aussi, nous considérons comme difficilement envisageable dans les pratiques, certaines combinaisons de deux dimensions excluant logiquement des options de valeurs pour la troisième. Par exemple, comment concrètement concilier un attribut de savoir universel, une posture épistémologique scientifique et une stratégie d'enseignement de type réalisme critique ? Simonneaux (2011) parle en effet d'une possible « distorsion » entre posture épistémologie et stratégie didactique (p. 146).

En ce qui concerne nos analyses, la notion de configurations didactiques peut servir de cadre de discussion de faits observés dans la pratique, au même titre que les déterminants de l'action. Certains éléments de l'analyse a priori du savoir, de l'étude de l'action enseignante et de l'épistémologie pratique devraient nous permettre de dessiner les contours de la configuration didactique du système observé. Celle-ci peut être mise en perspective avec les modèles archétypaux de l'enseignement des sciences décrits par Simonneaux (2011) (Figure 68), ou peut-être d'autres configurations didactiques mises en œuvre lors de l'enseignement des QSV en classes de sciences. Bien que les objets de savoir qui nous concernent ne relèvent pas de ce cadre (cf 4.1.5), le problème complexe que soulève le cycle du carbone dans l'enseignement de la chimie — l'origine anthropique du réchauffement climatique — possède des attributs de savoir similaires et pourrait relever des mêmes configurations didactiques.

## 8.2 Bilan de la méthodologie d'analyses

La méthodologie d'analyse des données à partir des traces récoltées dedans et hors de la classe nous permet de reconstruire les mécanismes de transposition didactique interne de façon pragmatique. Les étapes de cette méthodologie (Figure 69), à trois échelles — macro, méso et micro — nous donnent accès aux dynamiques des actions des sujets au sein du système didactique, mais aussi à différentes strates de déterminants didactiques.

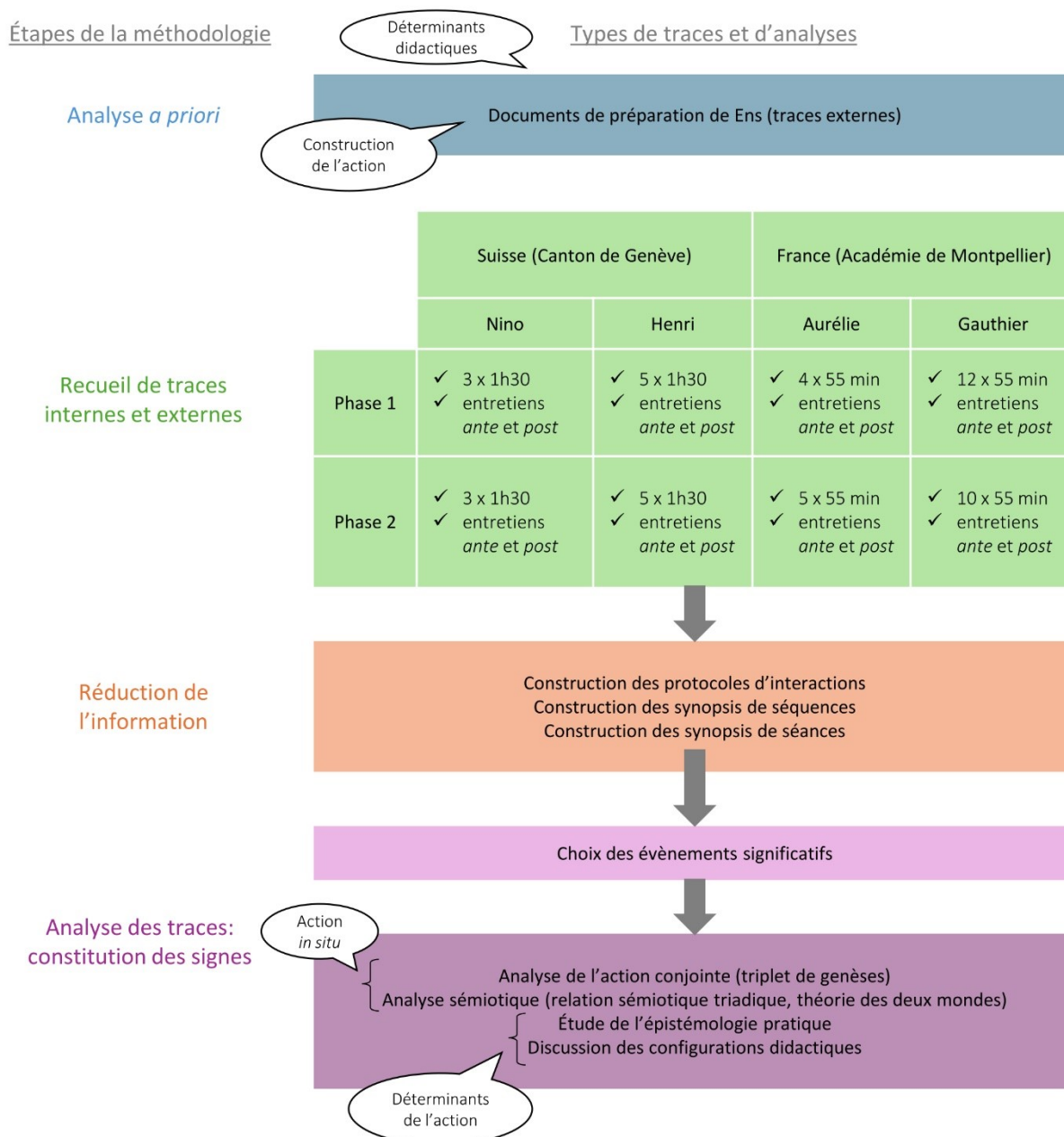


Figure 69 : schéma bilan des étapes de la méthodologie

Nous nous intéressons en particulier aux modifications des enjeux d'apprentissage tels qu'ils se dévoilent au fil des interactions entre les sujets à propos de la transformation chimique, repérés dans les synopsis. Ces enjeux peuvent être identifiés à différents grains de l'organisation de ces interactions. Dans les plus gros grains (macro et méso), ces enjeux sont assez clairement pilotés par le sujet enseignant : ils sont repérables par la présentation des objectifs de la séquence ou d'une séance, la

définition de certaines tâches à réaliser ou questions à étudier, dans des changements significatifs dans l'aménagement du milieu, ainsi qu'à travers certains gestes d'institutionnalisation. Dans les grains plus fins (micro, mais parfois aussi méso), ces enjeux résultent plus souvent d'une co-définition des situations d'apprentissage avec les élèves. Ainsi, plus on descend dans les niveaux fins d'organisation de l'action, plus on a accès à la manière dont les élèves interagissent avec les objets du milieu et leur donnent du sens. Ces différents éléments sont considérés comme traces de l'adaptation du système à la contrainte qui lui est appliquée (greffe).

Ainsi, la méthodologie d'analyse que nous avons élaborée vise à saisir les possibles configurations d'une codisciplinarité en classe de chimie, à travers l'étude du cycle du carbone. Nous cherchons en particulier à définir des indices d'une telle codisciplinarité, qui pourraient constituer à la fois des éléments de définition empirique de cette forme particulière d'interdisciplinarité (cf. Chapitre 4) et confirmer le potentiel de la discipline scolaire « chimie » pour enseigner un problème environnemental tel que le réchauffement climatique. Nous présenterons certains de ces aspects dans les chapitres 9 et 10, consacrés aux résultats de notre étude.

## **QUATRIÈME PARTIE : RÉSULTATS**

## CHAPITRE 9 — ÉTUDE DE L'ÉVOLUTION DES SYSTÈMES DIDACTIQUES SOUS L'INFLUENCE DU CYCLE DU CARBONE

Dans ce chapitre nous développons tout d'abord des analyses à l'échelle macro, afin d'apporter des éléments de réponse à la QR1 formulée dans le chapitre 6 : « Comment le système didactique relatif à la transformation chimique peut-il intégrer l'étude du cycle du carbone, objet codisciplinaire qui soulève un problème complexe relatif au réchauffement climatique ? En particulier, comment l'élaboration de la relation contrat-milieu peut-elle s'adapter à l'étude de cette complexité ? ». Ce premier niveau d'analyse permet de présenter les quatre études de cas qui structurent nos résultats et donnent des indices quant à la dimension du contrat didactique pensée par ces différents sujets enseignants. Dans un second temps, nous présentons des résultats d'analyse aux échelles méso et micro de deux enseignants, Nino et Gauthier, qui permettent de caractériser finement la relation contrat didactique-milieu de situations d'enseignement-apprentissage de la chimie impliquant le cycle du carbone. Nous avançons alors dans l'investigation de notre QR2 : « Comment l'enseignant ou l'enseignante de chimie utilise-t-il ou elle le cycle du carbone dans sa séquence sur la transformation chimique ? Quelle place est accordée dans le partage des responsabilités ? Quelles conséquences pour l'avancée de la chronogenèse ? ». Ces résultats apportent des indices de prise de la greffe — le cycle du carbone — et montrent la mise à l'étude d'un problème environnemental en classe de chimie.

9.1 Analyses à l'échelle macro : le contrat didactique dans sa dimension pilotée par le sujet enseignant

9.1.1 Le cas d'Aurélié<sup>85</sup>

### 9.1.1.1 Présentation du cas

Aurélié a une trentaine d'années. Après une année de classe préparatoire aux écoles d'ingénieurs, elle se réoriente vers une licence de physique-chimie, parcours « métiers de l'enseignement » (PCME), puis vers un Master « enseignement ». Au moment où nous réalisons l'entretien *ante*-observations — septembre 2020 —, elle enseigne depuis dix ans dans un collège « Réseau éducation prioritaire renforcée » (REP+) (Ministère de l'Éducation nationale et de la jeunesse, 2024a) au nord de Montpellier.

Aurélié enseigne la physique-chimie à plus d'une dizaine de classes, réparties de la 5<sup>e</sup> à la 3<sup>e</sup>. Le dispositif REP+ permet notamment de réduire l'effectif des classes. Celui-ci excède rarement vingt-cinq élèves par classe de 4<sup>e</sup>. Les enseignements de physique-chimie en 4<sup>e</sup> sont organisés sur une séance et demie par semaine en classe entière, soit une séance toutes les semaines et une séance supplémentaire tous les quinze jours.

Lorsque nous la questionnons sur l'établissement dans lequel elle enseigne, elle nous rapporte certaines difficultés dans la gestion de la discipline qui la conduisent à ajuster les activités qu'elle propose aux élèves. Par exemple, elle nous indique avoir remplacé un TP de modélisation des molécules avec des billes et de bâtonnets qui finissait systématiquement par des débordements par une activité sur un logiciel qui « fonctionne très bien » avec les élèves. Elle choisit aussi de déléguer certaines activités expérimentales aux élèves, sous la forme de « devoirs maisons » dont elle encourage l'enregistrement

---

<sup>85</sup> Les prénoms employés dans les chapitres de résultats sont fictifs.

au moyen des téléphones portables des élèves, afin de rapporter les résultats de l'expérience en classe la semaine suivante (par exemple : réaction du bicarbonate de soude et de l'acide acétique).

#### 9.1.1.2 La séquence ordinaire à propos de la réaction chimique

La séquence « Matière et réaction chimique » d'Aurélié est la première séquence de l'année, elle est donc mise en œuvre au mois de septembre 2020. La séquence « De la transformation chimique à l'équation de réaction » s'organise sur trois séances de classe et demie (le début de la séance 1 est consacré à une évaluation sur le modèle moléculaire). Aurélié commence par introduire un certain nombre de « définitions » des concepts associés au modèle de la réaction chimique (transformation chimique, transformation physique, réactifs, produits). Elle revient plusieurs fois sur l'importance des définitions au cours de l'entretien *ante-observations*. Selon elle, les élèves qui réussissent en chimie fournissent suffisamment de travail personnel, en particulier pour l'apprentissage des définitions et « des mots de vocabulaire ». Elle nuance cette idée alors que nous l'amenons à parler de l'évaluation. La notion du concept représenté par les définitions apparaît alors comme une dimension importante de l'apprentissage de la chimie (Extrait 1).

30) Ens: par contre je leur dis sur les mots de vocabulaire là heu je peux pas transiger dessus parce que c'est ce qu'on vous demande de retenir et puis heu ensuite d'avoir la bonne heu la bonne définition qui va aussi avec il suffit pas d'avoir juste le mot il faut comprendre le sens qu'il y a derrière donc ça pour moi c'est le premier point et le deuxième point c'est heu de comprendre que ces mots là ils ont un sens heu et que si on voit le vocabulaire après le vocabulaire y a c'est pas juste voir du vocabulaire pour juste donner des nouveaux mots c'est

*Extrait 1: entretien ante-observations avec Aurélié (phase 1) [19 : 07 à 19 : 44]*

En effet, la séquence d'Aurélié accorde une place importante à la modélisation de phénomènes expérimentaux. Plusieurs séances sont consacrées à l'interprétation de la réaction du bicarbonate de soude avec l'acide acétique, puis à la combustion du charbon. L'observation de l'ensemble de ces séances nous permet de reconstruire quatre enjeux pour la séquence « De la transformation chimique à l'équation de réaction » (Figure 70).

Enjeux de la séquence (N+1)	Enjeux N
Modélisation de la transformation chimique par la réaction chimique et étude des concepts associés (équation de réaction et principe de conservation)	Définition de la transformation chimique et de l'équation de réaction, distinction des transformation chimique, transformation physique et mélange <b>N1</b> <i>Séances 1-2 [48min40]</i>
	Etude qualitative de la réaction du bicarbonate de soude avec l'acide acétique : identification d'un changement de substances <b>N2</b> <i>Séance 2 [14min30]</i>
	Etude quantitative de la réaction du bicarbonate de soude avec l'acide acétique : principe de conservation de la matière <b>N3</b> <i>Séances 2 et 3 [50min]</i>
	Etude du cas des combustions (TP réaction de combustion du butane) : illustration des principes introduits précédemment <b>N4</b> <i>Séance 4 [55min]</i>

Figure 70 : synopsis de la séquence « De la transformation chimique à l'équation de réaction » d'Aurélie (phase 1)

La séquence élaborée par Aurélie est très centrée sur le modèle de la chimie (Kermen, 2018), en accord avec les recommandations du programme de physique-chimie de cycle 4 (cf. 3.1.2.3). Cette enseignante propose une approche plutôt transmissive des savoirs, introduisant l'ensemble des concepts avant de présenter des situations expérimentales où ceux-ci seront appliqués. Nous allons voir que cette approche transmissive, constitutive de la pratique d'enseignement d'Aurélie, va résister à l'intégration du cycle du carbone dans la séquence.

### 9.1.1.3 Restructuration de la séquence

En phase 2, Aurélie conserve la structure générale de sa séquence ordinaire, dans laquelle elle insère de nouveaux enjeux relatifs au cycle du carbone (N1, N3 et N10). On observe alors un morcellement de l'enjeu relatif à l'introduction des définitions des concepts qui dure près de cinquante minutes en phase 1 (N1) en une série de plusieurs enjeux de durées variables (de deux à vingt-quatre minutes) en phase 2 (N2, N4, N5 et N7). Ces derniers sont intercalés avec les enjeux introduisant le cycle du carbone, ce qui donne une impression de perte de cohérence par rapport à la phase 1 (Figure 71). Une analyse à des grains plus fins est nécessaire pour apporter des indices qualitatifs de cette supposée perte de cohérence. Nous explorons cela dans le chapitre 10. Toutefois, la vision synoptique nous permet d'identifier les attentes de l'enseignante à propos de cette séquence d'enseignement, avant et après l'insertion de la greffe. Nous observons en particulier une centration sur la modélisation de transformations chimiques comme des réactions chimiques et sur le principe de conservation de la matière, en accord avec le programme scolaire de ce niveau. De plus, Aurélie intègre une réflexion sur les conséquences des activités humaines sur l'environnement au terme de la séance 5. Les attentes de l'enseignante sont alors orientées vers l'étude d'un problème complexe.

Phase 1	
Enjeux de la séquence (N+1)	Enjeux N
Modélisation de la transformation chimique par la réaction chimique et étude des concepts associés (équation de réaction et principe de conservation)	Définition de la transformation chimique et de l'équation de réaction, distinction des transformation chimique, transformation physique et mélange <b>N1</b> <i>Séances 1-2 [48min40]</i>
	Etude qualitative de la réaction du bicarbonate de soude avec l'acide acétique : identification d'un changement de substances <b>N2</b> <i>Séance 2 [14min30]</i>
	Etude quantitative de la réaction du bicarbonate de soude avec l'acide acétique : principe de conservation de la matière <b>N3</b> <i>Séances 2 et 3 [50min]</i>
	Etude du cas des combustions (TP réaction de combustion du butane) : illustration des principes introduits précédemment <b>N4</b> <i>Séance 4 [55min]</i>

Phase 2	
Enjeux de la séquence (N+1)	Enjeux N
Etude des transformations chimiques impliquées dans le cycle du carbone ; introduction modèle de la réaction chimique et des concepts associés (équation de réaction et principe de conservation)	Présentation du cycle du carbone holocène et réflexion sur l'origine du dioxyde de carbone atmosphérique <b>N1</b> <i>Séance 1 [7min30]</i>
	Définition de la transformation chimique <b>N2</b> <i>Séances 1 [24min]</i>
	Présentation du cycle du carbone anthropocène et origine anthropique du dioxyde de carbone atmosphérique <b>N3</b> <i>Séance 1 [5min]</i>
	Définition de l'équation de réaction chimique <b>N4</b> <i>Séance 1 [2min]</i>
	Définition de la transformation chimique en comparaison à la transformation physique <b>N5</b> <i>Séance 1 [8min30]</i>
	Etude qualitative de la réaction du bicarbonate de soude avec l'acide acétique : identification d'un changement de substance <b>N6</b> <i>Séances 1 et 2 [28min]</i>
	Distinction des transformation chimique, transformation physique et mélange <b>N7</b> <i>Séance 2 [14min]</i>
	Etude quantitative de la réaction du bicarbonate de soude avec l'acide acétique : principe de conservation de la matière <b>N8</b> <i>Séance 3 [50min30]</i>
	Etude du cas des combustions (TP réaction de combustion du butane) : illustration des principes introduits précédemment <b>N9</b> <i>Séances 4 et 5 [1h 35min]</i>
	Conclusion sur le cycle du carbone : conséquences des activités humaines sur l'environnement <b>N10</b> <i>Séance 5 [3min]</i>

Figure 71 : comparaison des enjeux de séquences entre les phases 1 et 2 chez Aurélie

Dans les faits, la première version de la séquence qu'Aurélié nous présente au cours de l'entretien de préparation de la phase 2 d'observations — septembre 2021 — reprend exactement la structure de la séquence ordinaire avec une première partie transmissive centrée sur les définitions des « mots de vocabulaires » et des concepts. Le cycle du carbone n'intervient qu'au terme de la dernière séance, sous la forme d'exercices de modélisation des transformations qu'il met en jeu. Au cours de l'entretien, nous faisons part à Aurélié de notre hypothèse concernant la possible contextualisation des savoirs de la chimie à travers le cycle du carbone, en particulier son potentiel d'apodicticité. L'insistance de la chercheuse dans cet extrait de l'entretien rend visible une rupture dans le contrat de recherche. L'enseignante se place alors dans une posture d'exécutante, « s'adaptant » aux contraintes du projet de recherche (Extrait 2). Extrait 2: entretien ante-observations 2 avec Aurélié (phase 2) [06 : 29 à 08 : 08]

60) Ch : oui oui oui c'est sûr, mais hum tu vois j'trouve que sur ce schéma il permet aussi de partir des phénomènes parce que tu vois on voit bien heu ben que vraisemblablement l'usine heu elle rejette quelque chose et puis heu comme tu dis après on va ça amène à parler du co2 etc et que ça fait une bonne entrée en matière pour heu pour introduire ce ce modèle de la réaction que tu vas ensuite toi heu heu nommer pas vraiment nommer puisque tu vas utiliser l'équation de réaction etc sans dire que c'est la le modèle de la réaction en parlant de transformation / mais heu moi j'trouve ça pas mal de commencer par le cycle alors heu après il faut que tu sois suffisamment à l'aise toi avec ton organisation pour heu

61) Ens: mais tu voudrais que je le mette quand alors avant la définition de la transformation†

62) Ch : hum

63) Ens: j'ai pas compris en fait à quel endroit il faudrait que je le que je le place

64) Ch : ouais tu vois en tout début quand tu mets brainstorming oral sur ce qu'est une transformation† (*lit le document de préparation de Ens*)/

65) Ens: oui

66) Ch : heu tu vois ça peut être un moyen d'ouvrir le truc en disant ben voilà sur ce schéma heu y'a différentes transformations / heu est-ce que heu selon vous qu'est-ce que c'est est-ce que vous vous en voyez des exemples etc //

67) Ens: donc d'abord j'leur fais faire le brainstorming

68) Ch : mh

69) Ens: c'est quoi une transformation et ils me disent c'est une modification un changement etc

70) Ch : mmh

71) Ens: après j'leur montre le schéma†

72) Ch : oui

73) Ens: et ils j'leur dis et là où est-ce que vous voyez des transformations des choses comme ça

74) Ch : voilà /

75) Ens: ok

76) Ch : qu'est-ce que t'en penses†

77) Ens: ça ben c'est c'est « fin moi j'ai envie de dire c'est toi qui qui écris écris la thèse et qui en fait des choses donc c'est l'occasion de tester moi tu sais j'suis pas  
78) Ch : oui oui  
79) Ens: si tu as envie de faire comme ça heu je / fin c'est pas un souci tu sais je m'adapte

*Extrait 2: entretien ante-observations 2 avec Aurélie (phase 2) [06 : 29 à 08 : 08]*

Il est possible que notre demande ait provoqué le morcellement des enjeux au début de la séquence d'Aurélie en phase 2, contrainte d'intégrer le cycle du carbone en introduction vis-à-vis de son engagement envers nous, mais sans réelle motivation didactique. La structure du début de la séquence reconstruite à l'échelle macro (enjeux N1 à N5) serait alors le fruit d'un effet du contrat de recherche. Nous retrouvons ensuite les enjeux relatifs à l'étude de la réaction du bicarbonate de soude avec l'acide acétique déjà présents dans la séquence ordinaire — bien que cette réaction n'ait pas a priori de lien direct avec le cycle du carbone —, ainsi que l'enjeu relatif à la combustion du butane. Le cycle du carbone refait une apparition au terme de la séquence avec une conclusion sur les conséquences des activités humaines sur l'environnement. Comprendre l'articulation de ces différents enjeux, qui apparaissent orientés vers des objectifs d'enseignement-apprentissages différents à ce grain d'analyse, demande de descendre à des grains plus fins. Nous exposerons ces résultats dans le chapitre 10.

### 9.1.2 Le cas de Nino

#### 9.1.2.1 Présentation du cas

Nino a une quarantaine d'années. Au moment où nous réalisons le premier entretien — printemps 2021 —, il enseigne dans un établissement du cycle d'orientation (CO) du canton de Genève depuis dix-sept ans. Nino a été formé dans le canton de Vaud. Il a bénéficié d'une double formation en enseignement de la biologie (trois ans) et de la physique (un an et demi) au terme de laquelle il a obtenu une « Licence en sciences » lui permettant d'enseigner dans le secondaire inférieur.

Nino enseigne donc la biologie et la physique-chimie. En ce qui concerne cette dernière discipline scolaire, il a en responsabilité deux classes de 10<sup>e</sup> et cinq classes de 11<sup>e</sup> (cf. annexe 2 pour une comparaison des systèmes scolaires). Les classes ont un effectif moyen compris entre neuf et dix-sept élèves. Les classes que nous observons dans le cadre de notre étude sont des 11<sup>es</sup> années section « littéraire-scientifique » (LS). Selon le département de l'instruction publique (DIP), cette section « privilégie le développement et l'acquisition de connaissances et de démarches spécifiques aux Mathématiques, à la Biologie et à la Physique. Les élèves élaborent des stratégies de résolution de problèmes propres aux disciplines de ce profil en appliquant des raisonnements scientifiques et au travers d'activités expérimentales. » (DIP, 2021). En effet, dans les cantons romands de la Suisse, les élèves choisissent une section qui définit l'orientation disciplinaire des enseignements qu'elles et ils vont suivre en 10<sup>e</sup> et 11<sup>e</sup> années (cf. annexe 3). D'après Nino, les 11<sup>es</sup> LS sont les élèves les plus scolaires, et celles et ceux qui « réussissent le mieux en dernière année ». Il estime la classe que nous observons comme étant sa « meilleure classe », du point de vue des résultats aux évaluations, de l'ambiance de classe et de la dynamique d'apprentissages.

### 9.1.2.2 La séquence ordinaire à propos de la réaction chimique

Les séances de physique-chimie sont organisées sur deux « périodes de cours » consécutives de quarante-cinq minutes (soient une heure et demie par semaine). La séquence à propos des transformations chimiques intervient à la fin de l'année scolaire, après toutes les séquences de physique. Au cours de la phase 1, nous observons les pratiques ordinaires d'enseignement de Nino. Cette séquence de chimie se déploie sur deux séances et demie, la première période de la séance 1 étant consacrée à l'évaluation de la séquence de physique précédente. Nino nous confie s'inspirer des Moyens d'enseignement romands (MER) pour concevoir la structure de la séquence, tout en prenant des libertés quant aux exercices à donner aux élèves. En effet, si tous les documents présents dans les MER ne sont pas exploités, la séquence ordinaire de Nino présente une entrée très expérimentale. Au cours de chaque séance, une ou plusieurs expériences de transformation(s) chimique(s) est/sont mise(s) en œuvre, puis modélisée(s) à l'aide des concepts et modèles introduits au fil des séances<sup>86</sup>. Une place certaine est accordée à la résolution d'exercices d'écriture et d'équilibre d'équations de réactions (trente minutes, soient 20 % de la séquence). Au cours de l'entretien *ante*-observations ainsi que dans son discours en classe au cours de la séance 1, Nino insiste sur l'importance de préparer les élèves qui poursuivront l'enseignement de la chimie au collège (secondaire II). Selon lui, une partie importante de cette préparation consiste à savoir équilibrer les équations de réactions, procédé qui ne sera pas revu au collège. Il considère également que les élèves doivent être capables « d'interpréter » les situations expérimentales qui leur seront présentées. Nous comprenons cet objectif d'enseignement comme un enjeu de modélisation des phénomènes. Ainsi, le synopsis de séquence que nous construisons à partir des observations réalisées dans la classe de Nino présente cinq enjeux (Figure 73).

Enjeux de la séquence (N+1)	Enjeux N
Modélisation de la transformation chimique par les réactions chimiques et étude des concepts associés (équation, réactif, produit)	Etude de la réaction d'électrolyse de l'eau : approche macroscopique puis modélisation microscopique, définition de réaction, réactif et produit <b>N1</b> <i>Séance 1 [31min]</i>
	Etude de la réaction de combustion du butane : application du concept de réaction chimique <b>N2</b> <i>Séance 1 [5min]</i>
	Ecriture et équilibre d'équations de réaction <b>N3</b> <i>Séance 2 [36min]</i>
	Etude expérimentale de réactions de combustions (carbone, butane dihydrogène et fer) : application des concepts de réactifs et produit, écriture de l'équation de réaction et principe de conservation de la masse <b>N4</b> <i>Séances 2 et 3 [1h51]</i>
	Retour sur la combustion incomplète du méthane : prévention de l'intoxication au monoxyde de carbone <b>N5</b> <i>Séance 3 [8min20]</i>

Figure 73 : synopsis de la séquence « Matière et transformations » de Nino (phase 1)

En accord avec les prescriptions du PER pour le cycle 3 (cf. 3.1.2.3), les attentes de Nino sont orientées

<sup>86</sup> Cette démarche allant de la réalité perçue au modèle microscopique (Kermen, 2018) est préconisée pour l'enseignement des sciences expérimentales par Guy Robardet et son équipe au moment de la structuration du PER en 2010.

vers l'appropriation du modèle de la réaction chimique et le principe de conservation de la matière dans cette séquence. Nous remarquons également un enjeu en lien avec la vie quotidienne qui vise à prévenir les accidents domestiques relatifs à la production de monoxyde de carbone (N5). Cette structure est bousculée par notre proposition d'introduire le cycle du carbone lors de la deuxième année d'observations.

### 9.1.2.3 Restructuration de la séquence

La deuxième année d'observations, la séquence d'enseignement-apprentissage « Matière et transformations » intervient de nouveau à la fin de l'année scolaire, après les séquences concernant les savoirs de physique. La séquence développée par Nino intègre le cycle du carbone, sans modifier le nombre de séances prévues dans la séquence ordinaire (deux séances et demie). La restructuration est néanmoins visible au niveau de la définition des enjeux de la séquence (Figure 73). En effet, si la séquence ordinaire alterne des enjeux de définitions (N1 et N3) et des enjeux d'applications des concepts (N2, N4 et N5), on observe une réorganisation des enjeux en phase 2. Cette séquence présente une première partie plutôt théorique, avec l'introduction de la transformation chimique, du modèle de la réaction chimique et de l'équation de réaction à travers l'étude de la réaction d'électrolyse de l'eau (séances 1 et 2). Au cours de la séance 3, après mise en évidence du principe de conservation de la masse à travers l'expérience de combustion du fer (N4), ces concepts et modèles sont réinvestis au service de la modélisation de réactions de combustions, dont la majorité est introduite dans le cadre du cycle du carbone (enjeux N5 et N6). Les combustions étudiées dans le cadre de l'enjeu N5 sont l'occasion de mobiliser le modèle de la réaction chimique pour la compréhension des origines du réchauffement climatique. On observe alors une réorientation des attentes de l'enseignant vis-à-vis de cet objet de savoir. De plus, l'enjeu relatif à la prévention de l'intoxication au monoxyde de carbone disparaît. Peut-être par manque de temps ? Ou pour garder une certaine cohérence avec le thème du cycle du carbone ?

L'analyse d'extraits significatifs aux échelles méso et micro devrait préciser les modalités d'adaptation du système didactique à l'intégration du cycle du carbone. En particulier la nature des savoirs relatifs à la compréhension du réchauffement climatique co-construits dans les interactions des sujets. Nous détaillerons ces analyses dans la deuxième partie de ce chapitre (cf. 9.2).

Phase 1	
Enjeux de la séquence (N+1)	Enjeux N
Modélisation de la transformation chimique par les réactions chimiques et étude des concepts associés (équation, réactif, produit)	Etude de la réaction d'électrolyse de l'eau : approche macroscopique puis modélisation microscopique, définition de réaction, réactif et produit <b>N1</b> <i>Séance 1 [31min]</i>
	Etude de la réaction de combustion du butane : application du concept de réaction chimique <b>N2</b> <i>Séance 1 [5min]</i>
	Ecriture et équilibre d'équations de réaction <b>N3</b> <i>Séance 2 [36min]</i>
	Etude expérimentale de réactions de combustions (carbone, butane dihydrogène et fer) : application des concepts de réactifs et produit, écriture de l'équation de réaction et principe de conservation de la masse <b>N4</b> <i>Séances 2 et 3 [1h51]</i>
	Retour sur la combustion incomplète du méthane : prévention de l'intoxication au monoxyde de carbone <b>N5</b> <i>Séance 3 [8min20]</i>

Phase 2	
Enjeux de la séquence (N+1)	Enjeux N
Modélisation de la transformation chimique par les réactions chimiques et étude des concepts associés (équation, réactif, produit)	Présentation des objectifs du chapitre <b>N1</b> <i>Séance 1 [1min45]</i>
	Etude de la réaction d'électrolyse de l'eau : définition de la transformation chimique <b>N2</b> <i>Séance 1 [27min]</i>
	Modélisation microscopique de l'électrolyse de l'eau : écriture et équilibre de l'équation de réaction <b>N3</b> <i>Séance 2 [1h]</i>
	Etude du cas de combustion du fer : mise en évidence de la conservation de la masse au cours de réaction <b>N4</b> <i>Séance 2 [13min40]</i>
	Etudes de combustions en jeu dans le cycle du carbone : écriture d'équations de réaction et lien avec le réchauffement climatique <b>N5</b> <i>Séance 3 [1h07min20]</i>
	Etude des cas de combustion du dihydrogène et du butane : mise en relation des niveaux de modèle macroscopique et microscopique <b>N6</b> <i>Séance 3 [21min]</i>

Figure 74: comparaison des enjeux de séquences entre les phases 1 et 2 chez Nino

### 9.1.3 Le cas de Gauthier

#### 9.1.3.1 *Présentation du cas*

Gauthier a une trentaine d'années et enseigne la physique-chimie depuis quatre ans. Avant de se tourner vers l'enseignement secondaire, Gauthier a suivi un parcours en chimie qui a abouti à l'obtention de deux Masters orientés vers la recherche : un en chimie et l'autre en didactique des sciences expérimentales. Il est également professeur agrégé de chimie. Lorsque nous réalisons notre premier entretien en 2021, il commence sa troisième année d'enseignement dans un collège (secondaire I) d'une petite ville (au sens de la United Nations Statistical Commission, 2020) de l'académie de Montpellier. Après l'obtention de son Master « Métiers de l'enseignement, de l'éducation et de la formation » (MEEF), il a enseigné durant une année dans un lycée parisien (secondaire II) avant d'être muté dans l'établissement du sud de la France dans lequel il enseigne actuellement.

Dans son collège actuel, il enseigne à une dizaine de classes différentes, réparties sur tous les niveaux, de la 6<sup>e</sup> à la 3<sup>e</sup> (voir annexe 2 pour une comparaison des systèmes scolaires français et suisse-romand). Les classes ont en moyenne un effectif de vingt-cinq élèves. Dans cet établissement, l'organisation des enseignements en 4<sup>e</sup>, niveau qui fait l'objet de notre étude, permet un dédoublement des classes au cours d'une séance par semaine, c'est-à-dire que les élèves assistent à une séance de physique-chimie par semaine en classe entière, à laquelle s'ajoute une séance en demi-classe tous les quinze jours (soit une heure et demie de physique-chimie par semaine pour chaque élève).

Gauthier décrit l'établissement dans lequel il enseigne comme « dur » vis-à-vis du statut socio-économique des élèves qui le fréquentent. Il nous indique notamment un nombre important d'élèves allophones, mais aussi la présence d'enfants issus de communautés des gens du voyage qui rencontrent des problèmes d'assiduité ou peuvent arriver ou quitter l'établissement en cours d'année. Plus particulièrement, à propos des élèves que nous allons observer, il rapporte quelques difficultés dans la gestion de la discipline. Selon lui, si les résultats de la classe sont « très hétérogènes », il semblerait toutefois que les élèves bénéficient d'un accompagnement dans leur travail personnel qui leur permet de suivre et de participer en classe de physique-chimie.

#### 9.1.3.2 *La séquence ordinaire à propos de la réaction chimique*

Au cours de la phase 1, nous observons la séquence à propos du modèle de la réaction chimique élaborée par Gauthier. Celle-ci s'inscrit dans le cadre d'un projet développé pour la section « espagnol européen »<sup>87</sup>, en partenariat avec l'enseignante d'espagnol de cette classe, qui prépare notamment les élèves à un voyage scolaire en Espagne au printemps. Ainsi, Gauthier choisit de structurer sa séquence autour du thème « Des atomes et des molécules dans ma cuisine ». Il s'agit notamment de contextualiser les réactions chimiques étudiées à travers des recettes de spécialités culinaires espagnoles. Les attentes de Gauthier pour cette séquence, citées au cours de l'entretien et identifiées dans ses documents de préparation (Figure 75), concernent la mise en relation des différents niveaux du modèle de savoirs en chimie, en particulier l'interprétation des phénomènes via les modèles macroscopique et microscopique (cf. 2.2), en utilisant le principe de conservation (de la masse et des atomes). Mais aussi des compétences en termes de maîtrise du langage de la chimie (écrire des équations de réaction).

---

<sup>87</sup> Classe permettant un « horaire renforcé » pour l'enseignement d'une langue étrangère (Ministère de l'Education nationale et de la jeunesse, 2014).

### Chapitre 3 : Des atomes et des molécules dans ma cuisine

**J'ai déjà vu** : études des changements d'état, approche microscopique des états de la matière, corps purs et mélanges, mélanges hétérogènes et homogènes, les transformations chimiques et physiques, modélisation, particule.

Je suis capable de	Activités	😊	😐	😞
Définir les mots : <b>transformation chimique, équation de réaction, réaction chimique, atome, molécule</b>	Act3.1 – Act3.2			
Reconnaître une transformation chimique	Act3.2 – Act3.3			
Ecrire des équations de réaction	Act3.2 – Act3.3			
Montrer et utiliser la conservation de la masse	Act3.3			
Représenter des atomes	Act3.1			
Distinguer atome et molécule	Act3.1			
Donner la composition d'une molécule en interprétant sa formule chimique	Act3.1 – Act3.2			
Vérifier qu'une réaction traduit la conservation des atomes	Act3.2 – Act3.3			
Ajuster les coefficients d'une équation pour équilibrer celle-ci	Act3.2 – Act3.3			

Figure 75 : document d'auto-évaluation de la séquence « Des atomes et des molécules dans ma cuisine » de Gauthier distribué aux élèves

Ces enjeux correspondent aux recommandations des programmes concernant la modélisation des transformations de la matière au cycle 4.

La séquence est découpée en trois « activités » (Figure 76), programmées sur trois séances différentes, et s'achève par une séance d'exercices et de préparation de l'évaluation.

#### Activité 3.1 : La crème catalane

On dit souvent que « la chimie, c'est de la cuisine ». En effet, pour maîtriser ces deux disciplines, il faut comprendre ce qu'il se passe à l'échelle microscopique pour pouvoir expliquer et prévoir ce qu'on voit dans le bécher ou dans la casserole ! Mais lorsqu'une recette mélange le vocabulaire de cuisine et les symboles chimiques, il faut pouvoir la décrypter !

#### Activité 3.2 : Etude de la cuisson de la Paella

Lorsqu'on prépare une paëlla, la cuisson est une étape primordiale qu'il ne faut pas rater ! C'est pourquoi nous allons nous intéresser aux étapes clés de cette recette et aux combustions qui fournissent de la chaleur (feu).

#### Activité 3.3 : Ensaimadas

Lors d'une épreuve du CAP de cuisine, il est demandé aux candidats de préparer un gâteau traditionnel des îles baléares : les ensaimadas, qui s'apparentent à des brioches aérées. Le jury demande alors à chaque candidat : « d'après vous, lorsque vous laissez gonfler la pâte, le gâteau est-il plus lourd ou plus léger ? »

Figure 76 : extraits des introductions des trois activités de la séquence de Gauthier

Gauthier profite du dispositif de dédoublement de la classe pour réaliser l'activité 3.2 de façon différenciée entre un premier groupe d'élèves qu'il juge « faible » et un second groupe d'élèves « fort ». Les autres activités sont mises en œuvre en classe entière.

L'analyse des observations de l'ensemble de ces séances nous permet de reconstruire cinq enjeux, présentés dans le synopsis de séquence (Figure 77).

Enjeux de la séquence (N+1)	Enjeux N
Modélisation de la transformation chimique par la réaction chimique et étude des concepts associés (équation de réaction et principe de conservation)	Etude de la réaction du saccharose avec l'eau : définition de la transformation chimique, modélisation microscopique de la réaction chimique, définition de réactifs et produits <b>N1</b> <i>Séance 1 [4min]</i>
	Etude quantitative de la réaction du bicarbonate de soude et de l'acide tartrique : introduction du principe de conservation (niveaux macroscopique et microscopique) <b>N2</b> <i>Séance 2 [51min40] (x2)</i>
	Etude qualitative de la réaction du bicarbonate de soude et de l'acide tartrique : identification des indicateurs macroscopiques de la transformation chimique <b>N3</b> <i>Séance 2 [4min20] (x2)</i>
	Retour sur la réaction du saccharose avec l'eau : illustration du principe de conservation des atomes <b>N4</b> <i>Séance 3 [9min]</i>
	Etude de la combustion du méthane : mise en relation de la transformation chimique et de la réaction chimique, écriture de l'équation de réaction <b>N5</b> <i>Séance 3 [44min40]</i>

Figure 77 : synopsis de la séquence « Des atomes et des molécules dans ma cuisine » de Gauthier (phase 1)

Après cette séquence d'introduction des transformations chimiques et du modèle de la réaction chimique, Gauthier prévoit une séquence de révisions et d'application de ces concepts de chimie à travers l'étude de phénomènes en lien avec les problèmes environnementaux. Cette séquence qui convoque également des concepts de physique se positionne comme un bilan des enseignements dispensés dans la première moitié de l'année scolaire et intervient dans le courant des mois de février et mars 2022 (Figure 78).

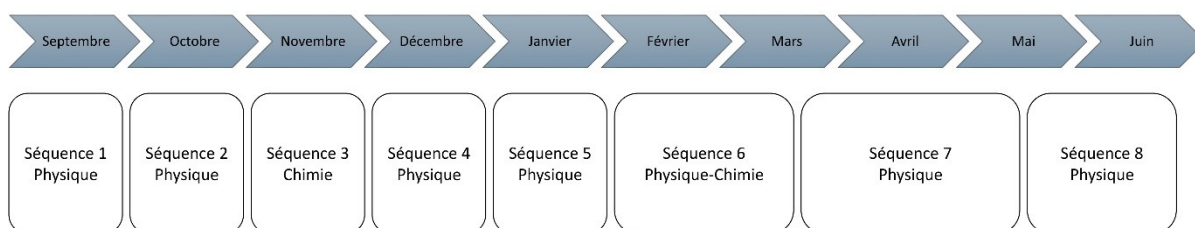


Figure 78 : programmation de Gauthier 2021-2022 pour les classes de 4e

La séquence « Des problèmes environnementaux » est organisée en six « activités », chacune faisant l'objet d'une séance (ou deux en cas de dédoublement de la classe). Les enjeux d'enseignement et d'apprentissage concernent en particulier les savoirs relatifs à l'énergie et aux transformations chimiques (Figure 79).

## Chapitre 6 : Des problèmes environnementaux

**J'ai déjà vu :** les formes d'énergie, les sources d'énergie, les transferts et conversions de l'énergie, chaîne d'énergie, transformation chimique, réactifs, produits, puissance, combustion.

Je suis capable de	Activités	😊	😐	😞
Définir les mots : <b>énergie, puissance, énergies lumineuse, thermique, électrique et chimique, combustion, conversion d'énergie, transfert d'énergie</b>	Act6.1 – Act6.2			
Utiliser le vocabulaire correct lié à la conservation de l'énergie	Act6.2			
Représenter un convertisseur d'énergie par une chaîne énergétique	Act6.1 – Act6.2			
Utiliser ou vérifier le principe de conservation de l'énergie	Act6.2			
Analyser une situation du point de vue des transferts et des conversions d'énergie	Act6.1 – Act6.2			
Tracer la chaîne énergétique d'une situation simple	Act6.1 – Act6.2			
Proposer un protocole permettant d'évaluer la puissance d'un appareil	Act6.4			
Utiliser la relation liant l'énergie, la puissance et la durée d'utilisation.	Act6.4			
Schématiser un test d'identification	Act6.3			
Détecter la présence de dioxyde de carbone	Act6.3			
Reconnaître une transformation chimique	Act6.5			
Ecrire des équations de réaction	Act6.5			
Vérifier qu'une réaction traduit la conservation des atomes	Act6.5			
Proposer et mettre en œuvre un protocole pour mesurer les tensions et les intensités dans un circuit	Act6.6			
Brancher un ampèremètre pour mesurer une intensité	Act6.6			

Figure 79 : document d'auto-évaluation de la séquence « Des problèmes environnementaux » distribué aux élèves

Parmi eux, nous reconnaissons des enjeux déjà présents dans la séquence « Des atomes et des molécules dans ma cuisine », en particulier la modélisation des transformations chimiques comme des réactions chimiques et la rédaction de l'équation de réaction correspondante. Nous focalisons nos observations sur les séances qui traitent de ces enjeux, soit trois séances, dont deux sont menées deux fois avec les groupes différenciés (cinq séances au total). La séquence s'achève par une évaluation orale organisée sur deux séances. Ces évaluations consistent en des présentations de type « classe renversée » (Cailliez & Henin, 2017), par groupes d'élèves.

Le synopsis de séquence que nous élaborons à partir des observations de classe se limite donc à la partie concernant la chimie de l'enjeu global « Étude en termes de bilans énergétiques et de transformations chimiques de problèmes environnementaux quotidiens », dans laquelle nous reconstruisons trois enjeux (Figure 80).

Enjeux de la séquence (N+1)	Enjeux N
Etude en termes de bilans énergétiques et de transformations chimiques de problèmes environnementaux quotidiens	Etude de la combustion de l'acide stéarique composant les bougies <b>N1</b> <i>Séances 1 et 2 [12min40 (x2)]</i>
	Etude de la combustion du dihydrogène dans les voitures électriques et effets sur l'environnement <b>N2</b> <i>Séance 3 [45min40]</i>
	Etude de la combustion du charbon dans les centrales thermiques et effets sur l'environnement <b>N3</b> <i>Séances 4 et 5 [52min40 (x2)]</i>

Figure 80 : synopsis de la séquence « Des problèmes environnementaux » de Gauthier (phase 1)

Notre proposition d'intégrer le cycle du carbone au début de la deuxième année d'observation (phase 2) provoque un certain nombre de modifications dans la structuration de ces deux séquences.

### 9.1.3.3 Restructuration de la séquence

Pour intégrer le cycle du carbone à sa séquence à propos de la transformation chimique, Gauthier choisit d'abandonner le thème de la cuisine au cours de la phase 2. Il conserve la structure en deux séquences, mais choisit le thème de l'environnement comme « fil rouge » de ses enseignements pour la première partie de l'année. La première séquence : « Cycle du carbone et empreinte carbone » intervient dès le mois de septembre 2022 pour introduire les concepts et modèles relatifs aux transformations chimiques. La séquence « L'impact de l'être humain sur le cycle du carbone » est mise en œuvre au mois d'octobre 2022 dans le prolongement de la première (Figure 81). Cette séquence est l'occasion de réinvestir les savoirs de chimie introduits précédemment, mais aussi d'aborder d'autres concepts relatifs aux propriétés de la matière : le pH, la solubilité et la masse volumique.

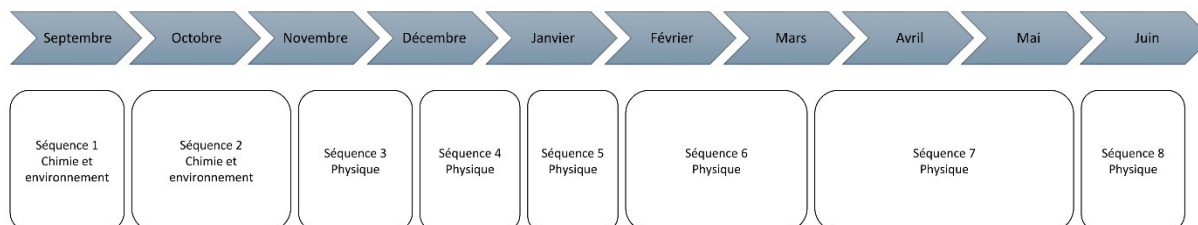


Figure 81 : programmation de Gauthier 2022-2023 pour les classes de 4<sup>e</sup>

Comme au cours de la phase 1, les séquences s'organisent en différentes activités (quatre activités pour la séquence 1 et cinq activités pour la séquence 2), faisant chacune l'objet d'une séance. Grâce au dispositif de dédoublement des classes de 4<sup>e</sup>, les activités 1.2, 1.4, 2.2, et 2.4 font l'objet de séances différenciées en demi-classe. Les groupes sont à nouveau constitués par l'enseignant en fonction du niveau des élèves (un groupe « fort » et un groupe « faible »). Une séance d'exercices et de préparation de l'évaluation conclut chacune de ces deux séquences (Figure 82).

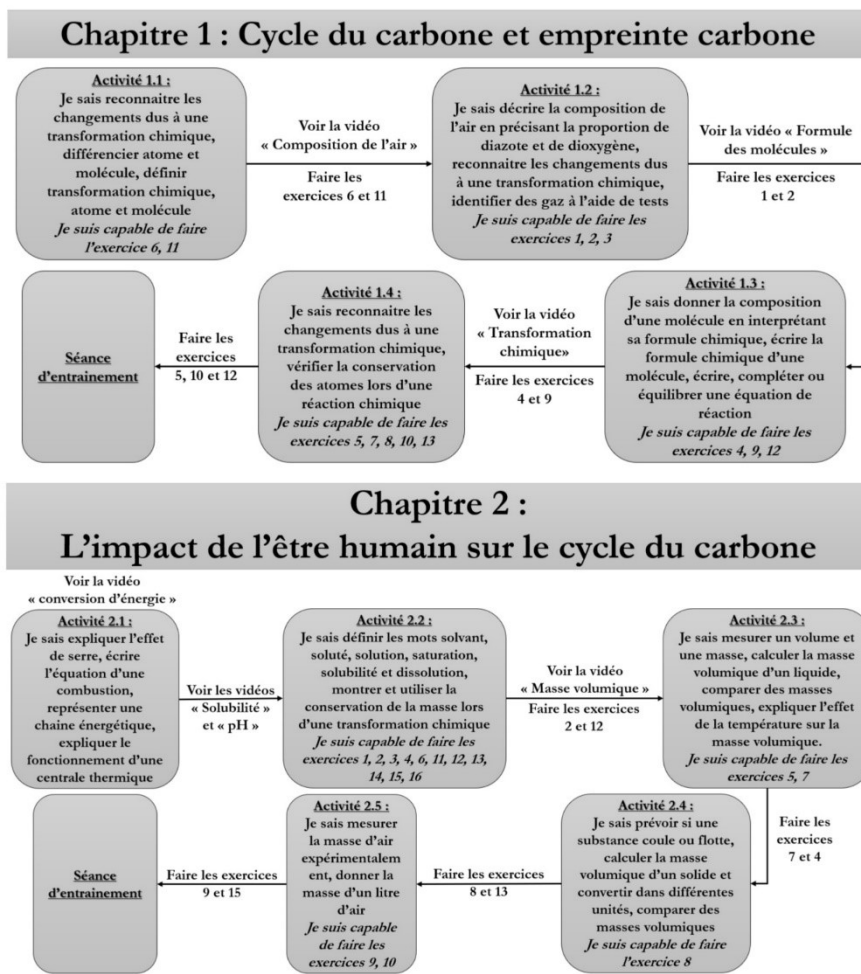


Figure 82 : documents d'auto-évaluation des séquences 1 (haut) et 2 (bas) de Gauthier distribués aux élèves

L'observation de l'ensemble des séances nous permet de reconstruire les enjeux de chaque séquence. Ainsi, la comparaison des synopsis de séquence des phases 1 et 2 (Figure 83) met en évidence la conservation de certains enjeux d'apprentissage notamment relatifs au modèle de la réaction chimique, au principe de conservation de la matière, à l'équation de réaction chimique, mais aussi à l'étude des conséquences de certaines activités humaines sur l'augmentation de l'effet de serre (transports et centrales à charbon). Nous constatons également une profonde restructuration de ces enjeux en phase 2, en particulier avec l'introduction du cycle du carbone dès le début de la séquence 1. Ainsi, apparaissent dans la séquence « Cycle du carbone et empreinte carbone » de nouveaux enjeux relatifs au cycle du carbone. Ces enjeux, d'une durée maximale de dix minutes (N1 et N6), interviennent à l'articulation d'enjeux relatifs à la modélisation de phénomènes biologiques grâce à la réaction chimique (N5) et des rappels sur les savoirs de chimie (N2 et N7). Nous ne retrouvons pas de tels enjeux au cours de la séquence « L'impact de l'être humain sur le cycle du carbone ». Dans cette séquence, le cycle du carbone n'apparaît pas au niveau d'analyse macro. Cependant, au terme de la séance 2, les attentes de l'enseignant à propos du savoir semblent orientées vers l'étude de l'augmentation de l'effet de serre, outillée par les modèles disciplinaires revus jusqu'alors.

Phase 1	
Enjeux de la séquence (N+1)	Enjeux N
<b>Séquence 3: "Des atomes et des molécules dans ma cuisine"</b>	
Modélisation de la transformation chimique par la réaction chimique et étude des concepts associés (équation de réaction et principe de conservation)	Etude de la réaction du saccharose avec l'eau : définition de la transformation chimique, modélisation microscopique de la réaction chimique, définition de réactifs et produits <b>N1</b> <i>Séance 1 [4min]</i>
	Etude qualitative de la réaction du bicarbonate de soude et de l'acide tartrique : identification des indicateurs macroscopiques de la transformation chimique <b>N2</b> <i>Séance 2 [4min20] (x2)</i>
	Etude quantitative de la réaction du bicarbonate de soude et de l'acide tartrique : introduction du principe de conservation (niveaux macroscopique et microscopique) <b>N3</b> <i>Séance 2 [51min40] (x2)</i>
	Retour sur la réaction du saccharose avec l'eau : illustration du principe de conservation des atomes <b>N4</b> <i>Séance 3 [9min]</i>
	Etude de la combustion du méthane : mise en relation de la transformation chimique et de la réaction chimique, écriture de l'équation de réaction <b>N5</b> <i>Séance 3 [44min40]</i>
<b>Séquence 6: "Des problèmes environnementaux"</b>	
Etude en termes de bilans énergétiques et de transformations chimiques de problèmes environnementaux quotidiens	Etude de la combustion de l'acide stéarique composant les bougies <b>N1</b> <i>Séances 1 et 2 [55min (x2)]</i>
	Etude de la combustion du dihydrogène dans les voitures électriques et effets sur l'environnement <b>N2</b> <i>Séance 3 [45min40]</i>
	Etude de la combustion du charbon dans les centrales thermiques et effets sur l'environnement <b>N3</b> <i>Séances 4 et 5 [52min40 (x2)]</i>

Phase 2	
Enjeux de la séquence (N+1)	Enjeux N
<b>Séquence 1: "Cycle du carbone et empreinte carbone"</b>	
Modélisation des transformations chimiques en jeu dans le cycle du carbone par la réaction chimique et étude des concepts associés (équation de réaction et principe de conservation)	Présentation du cycle du carbone : potentiel pour comprendre l'anthropocène <b>N1</b> <i>Séance 1 [2min]</i>
	Etude macroscopique de la réaction d'oxydation du mercure : introduction du principe de conservation, tests d'identification des gaz <b>N2</b> <i>Séance 1 [51min20] (x2)</i>
	Comparaison de l'effet sur l'environnement des voitures électriques et thermiques : modèle de la réaction chimique, concepts d'atome et de molécule et équation de réaction, principe de conservation <b>N3</b> <i>Séance 2 [46min20]</i>
	Rappels des notions introduites précédemment : composition de l'air, atome, molécule <b>N4</b> <i>Séance 4 [12min20]</i>
	Etude de la réaction de respiration animale : modélisation microscopique, équation de réaction, test d'identification du dioxyde de carbone <b>N5</b> <i>Séance 4 [37min45]</i>
	Retour au cycle du carbone : identification des molécules qui composent les substances mises en jeu <b>N6</b> <i>Séances 4 et 5 [10min30]</i>
	Rappel des concepts introduits précédemment : définition de la transformation chimique principe de conservation des atomes via une analogie (activité informatique), écriture de l'équation de réaction <b>N7</b> <i>Séance 5 [33min]</i>
<b>Séquence 2: "L'impact de l'être humain sur le cycle du carbone"</b>	
Révision de concepts de physique et de chimie à travers l'étude de problèmes environnementaux présents dans le cycle du carbone	Etude de l'acidification des océans par dissolution du dioxyde de carbone gazeux : rappel de la définition de la transformation chimique, principe de conservation, mesure du pH <b>N1</b> <i>Séances 1 et 2 [1h10min]</i>
	Etude des centrales à charbon : réaction de combustion du carbone (équation de réaction), bilan énergétique, réflexion sur les effets des activités humaines sur le climat (effet de serre) <b>N2</b> <i>Séance 2 [33min]</i>
	Etude des quelques métaux lourds et conséquence sur l'environnement : masse volumique <b>N3</b> <i>Séance 3 [55min] (x2)</i>
	Etude des conséquences de la pollution de l'air : masse de l'air, masse volumique, réaction de formation de l'ozone <b>N4</b> <i>Séance 4 [35min]</i>

Figure 83 : comparaison des enjeux de séquences entre les phases 1 et 2 chez Gauthier

L'analyse à l'échelle macro nous permet d'identifier les profondes modifications apportées par Gauthier à sa séquence ordinaire à propos des transformations chimiques et du modèle de la réaction chimique afin d'intégrer le cycle du carbone. Ce grain d'analyse met en évidence l'importance accordée aux concepts et modèles liés aux transformations chimiques, en accord avec le programme de chimie de cycle 4. Nous constatons également la sensibilité de cet enseignant aux problèmes environnementaux, en particulier l'origine anthropique du changement climatique, qui se traduit par la présence d'enjeux d'enseignement-apprentissage relatifs à l'étude de cette question au prisme des savoirs de physique et de chimie déjà dans ses pratiques ordinaires (phase 1). L'analyse à des grains plus fins d'extraits de séances significatifs devrait nous permettre de reconstruire les conditions de mise en œuvre en classe de tels enjeux, et notamment comprendre comment l'objet « cycle du carbone » y contribue en phase 2. Ces analyses feront l'objet de la deuxième partie de ce chapitre (cf. 9.2).

#### 9.1.4 Le cas d'Henri

##### 9.1.4.1 *Présentation du cas*

Enfin, nous travaillons avec Henri, un enseignant du canton de Genève âgé d'une quarantaine d'années. Henri est français. Il a enseigné en France en tant que suppléant pendant quatre ans avant d'obtenir le certificat d'aptitude au professorat de l'enseignement du second degré (CAPES) de physique-chimie. Après six années supplémentaires dans l'enseignement secondaire en France, il postule dans l'établissement du cycle d'orientation du centre de Genève où il enseigne depuis treize ans lorsque nous le rencontrons pour la première fois en février 2022. Dans cet établissement il enseigne la physique-chimie et les mathématiques en 10<sup>e</sup> et 11<sup>e</sup> années, ce qui correspond à une dizaine de classes en tout.

Les cours de physique-chimie de 11<sup>e</sup> année — le niveau qui nous intéresse — sont organisés sur deux périodes consécutives de quarante-cinq minutes, soit une heure et demie par semaine.

La classe que nous observons est une section LS. Henri décrit des élèves autonomes et « demandeurs », qui posent beaucoup de questions.

##### 9.1.4.2 *La séquence ordinaire à propos de la réaction chimique*

Henri suit strictement le contenu proposé par les MER. La séquence « Transformations physiques et chimiques » propose l'étude de plusieurs phénomènes expérimentaux (l'électrolyse de l'eau, la combustion du fer, la combustion du butane et la combustion du carbone) et de leur interprétation à travers le modèle de la réaction chimique. Selon la méthode préconisée par le PER dont nous avons parlé précédemment (cf. 9.1.2.2), l'étude des phénomènes est l'occasion d'introduire les concepts et les modèles enjeux de la séquence (Figure 84).

Enjeux de la séquence (N+1)	Enjeux N
Modélisation de la transformation chimique par la réaction chimique et étude des concepts associés (réactif, produit, principe de conservation)	Etude de la réaction d'électrolyse de l'eau : introduction de l'équation de réaction et du principe de conservation (macro et micro) <b>N1</b> <i>Séances 1, 2 et 3</i> <i>[2h20]</i>
	Etude de la combustion du fer : interprétation du principe de conservation de la masse par la conservation des atomes <b>N2</b> <i>Séance 3</i> <i>[1h01]</i>
	Etude de la combustion du butane : réinvestissement des concepts de réactif, produit et du principe de conservation pour équilibrer l'équation de réaction <b>N3</b> <i>Séance 4</i> <i>[51min]</i>
	Entraînement pour l'évaluation : exercices d'application <b>N4</b> <i>Séance 4</i> <i>[38min]</i>
	Correction de l'évaluation <b>N5</b> <i>Séance 5</i> <i>[35min]</i>
	Etude de la combustion du carbone : réinvestissement des concepts de réactif, produit et du principe de conservation pour équilibrer l'équation de réaction <b>N6</b> <i>Séance 5</i> <i>[35min]</i>

Figure 84 : synopsis de la séquence « Transformations physiques et chimiques » d'Henri (phase 1)

La séquence ordinaire d'Henri s'organise sur cinq séances différentes. Les séances 1 et 5 ne font l'objet que d'une seule période d'enseignement, soit une séquence de quatre séances en temps absolu. Nous remarquons à l'échelle d'analyse macro que l'équivalent d'une heure quinze d'enseignement sont consacrées à la préparation de l'évaluation puis à sa correction (un peu moins d'un quart de la séquence totale). Ces enjeux propres à l'évaluation (N4 et N5) sont suivis par un retour à l'étude d'un cas de combustion. L'enseignant nous confie au cours de l'entretien *post-observations* qu'il va revenir sur l'étude de la combustion du carbone parce qu'il estime que les élèves n'ont pas toutes et tous compris le modèle de la réaction chimique, sur la base des résultats à l'évaluation (Extrait 3).

4) Ens: ils ont beaucoup de mal à à intégrer les formules chimiques les les les matières qu'ils manipulent et puis de les mettre en équation  
5) Ch : ok, donc y'a t'as l'impression un espèce de blocage  
6) Ens: ouais  
7) Ch : entre heu l'interprétation «fin le phénomène et l'interprétation  
8) Ens: ouais pourtant t'as vu un peu c'qu'on a fait bon on a quand même pas mal rabâché et quand tu vois les copies heu

Extrait 3:entretien *post-observations* avec Henri (phase 1) [00 : 42 à 01 : 00]

Il impute en partie ces mauvais résultats à un manque de travail des élèves, qui, selon lui, ont l'habitude d'obtenir de bons résultats en physique sans fournir beaucoup de travail personnel. Selon Henri, le chapitre de chimie qui intervient en fin d'année (mai-juin 2022) constitue un palier à franchir sur le plan de la modélisation. Il observe également tous les ans un désinvestissement des élèves dans les apprentissages en fin d'années (Extrait 4).

14) Ens: parce que c'est vrai que c'qu'on fait au cycle en termes de physique-chimie c'est pas trop compliqué / en écoutant bien en cours et en / en travaillant un petit peu ils s'en sortent bien et là la chimie tous les ans on voit qu'il y a un un petit pallier de heu à surmonter qui ben qu'ils arrivent pas en plus c'est la fin de l'année les vacances approchent / est-ce qu'on pourrait pas faire ça peut-être en début d'année je sais pas↓

15) Ch : mmh

16) Ens: c'est possible que il faudrait tester

17) Ch : ok

18) Ens: faire ça en on prend une ou deux classes pilotes tu vois et puis changer carrément l'ordre des / des des chapitres et pourquoi pas voir si c'est mieux intégré

*Extrait 4: entretien post-observations avec Henri (phase 1) [01 : 25 à 01 : 58]*

La proposition d'intégrer le cycle du carbone la deuxième année d'observations a peu de conséquences sur la structure de la séquence d'Henri et sur l'engagement des élèves dans le processus d'enseignement-apprentissage, bien qu'il choisisse effectivement d'enseigner cette séquence plus tôt dans l'année scolaire.

#### *9.1.4.3 Restructuration de la séquence*

La comparaison des synopsis de séquences en phase 1 et en phase 2 d'observations révèle un maintien des attentes de l'enseignant, orientées vers l'appropriation du principe de conservation de la matière, malgré l'insertion du cycle du carbone dans la séquence (Figure 85). L'ordre des enjeux est cependant modifié et la durée totale de la séquence augmentée. En effet, en phase 2, Henri débute la séquence « Transformations physiques et chimiques » au mois de janvier 2023. Différentes interruptions liées notamment aux vacances d'hiver et aux voyages scolaires à la montagne de la classe, puis de l'enseignant, prolongeront cette séquence jusqu'à la fin du mois de mars. Au total, celle-ci s'organise sur six séances différentes, parmi lesquelles deux ne durent qu'une seule période (séances 1 et 6), soient cinq séances d'enseignement en temps absolu. Le grain d'analyse macro nous permet de repérer la mention du cycle du carbone dans l'enjeu relatif à la combustion du carbone. Toutefois, les attentes d'Henri ne se situent pas au niveau de l'étude d'un problème environnemental à l'échelle de cette séquence.

Dans les faits, si Henri manifeste son intérêt pour le cycle du carbone au moment où nous lui présentons notre proposition (entretien *ante*-observations 1, août 2022), il n'a vraisemblablement pas pensé les modalités d'étude du réchauffement climatique en lien avec le modèle de la réaction chimique, enjeu principal de sa séquence. Au cours du second entretien de préparation de la phase 2 (décembre 2022), il nous explique que le cycle du carbone sera un moyen d'illustrer le principe de conservation de la matière.

L'analyse aux échelles méso et micro que nous développons dans le chapitre 10 apporte des éléments quant au déploiement de cet enjeu au niveau de l'organisation des phases de l'action, en particulier les conditions de sa mise en relation avec le modèle de la réaction chimique.

Phase 1		Phase 2	
Enjeux de la séquence (N+1)	Enjeux N	Enjeux de la séquence (N+1)	Enjeux N
Modélisation de la transformation chimique par la réaction chimique et étude des concepts associés (réactif, produit, principe de conservation)	Etude de la réaction d'électrolyse de l'eau : introduction de l'équation de réaction et du principe de conservation (macro et micro) <b>N1</b>  Séances 1, 2 et 3 [2h20]	Modélisation de la transformation chimique par la réaction chimique et étude des concepts associés (réactif, produit, principe de conservation)	Etude de la réaction d'électrolyse de l'eau : introduction des concepts d'atome, de molécule, d'équation de réaction chimique et du principe de conservation des atomes <b>N1</b>  Séances 1, 2 et 3 [2h17min30]
	Etude de la combustion du fer : interprétation du principe de conservation de la masse par la conservation des atomes <b>N2</b>  Séance 3 [1h01]		Etude de la réaction de combustion du carbone : application des concepts introduits précédemment, lien avec le cycle du carbone et prévention de l'intoxication au monoxyde de carbone <b>N2</b>  Séance 3 [41min30]
	Etude de la combustion du butane : réinvestissement des concepts de réactif, produit et du principe de conservation pour équilibrer l'équation de réaction  <b>N3</b> Séance 4 [51min]		Préparation de l'évaluation <b>N3</b>  Séance 3 [37min]
	Entraînement pour l'évaluation : exercices d'application  <b>N4</b>  Séance 4 [38min]		Etude des réactions de combustions du méthane et du butane : application des concepts introduits précédemment <b>N4</b>  Séances 4 et 5 [1h58min]
	Correction de l'évaluation <b>N5</b> Séance 5 [35min]		Etude de l'évolution de la masse au cours de la réaction de combustion du fer : application du principe de conservation de la matière <b>N5</b>  Séance 5 [30min20]
	Etude de la combustion du carbone : réinvestissement des concepts de réactif, produit et du principe de conservation pour équilibrer l'équation de réaction <b>N6</b>  Séance 5 [35min]		Exercices d'entraînement à l'équilibre d'équations de réactions <b>N6</b> Séance 5 [10min]
			Correction de l'évaluation et rappels <b>N7</b> Séance 6 [1h30min]

Figure 85 : comparaison des enjeux des séquences entre les phases 1 et 3 chez Henri

## 9.2 Analyses aux échelles méso et micro : deux exemples d'émergence de la codisciplinarité dans la restructuration des séquences

L'analyse à l'échelle macro que nous venons de développer pour chaque enseignant ou enseignante apporte des éléments de réponse à la QR1, en particulier des indices de l'élaboration du contrat didactique dans sa dimension pilotée par le sujet enseignant — c'est-à-dire ce que nous pouvons percevoir de leurs attentes à propos des objets de savoirs. En descendant à des grains d'analyse plus fins nous cherchons des indices nous permettant de répondre à la deuxième partie de notre QR1 : « En particulier, comment l'élaboration de la relation contrat-milieu peut-elle s'adapter à l'étude de cette complexité ? » ainsi qu'à notre QR2 : « Comment l'enseignant ou l'enseignante de chimie utilise-t-il ou elle le cycle du carbone dans sa séquence sur la transformation chimique ? Quelle place est accordée dans le partage des responsabilités ? Quelles conséquences pour l'avancée de la chronogenèse ? ». L'étude d'extraits significatifs outillée par le triplet de genèses et les descripteurs de la structure fondamentale de l'action conjointe devrait nous permettre d'investiguer la relation contrat didactique-milieu dans chaque situation.

Dans la section qui suit, nous choisissons de présenter deux cas contrastés. Premièrement, le cas de Nino est particulièrement représentatif d'un aménagement économique de la séquence à propos de la transformation chimique vers l'étude du réchauffement climatique à la lumière des savoirs de chimie, c'est-à-dire sans modification profonde ni allongement conséquent de la séquence ordinaire. Nous considérons ce cas comme emblématique de ce qui se passe également chez Aurélie et Henri en phase 2 du point de vue de l'évolution de la fonction du modèle de la réaction chimique dans la séquence. C'est pourquoi nous présentons une première analyse aux échelles méso et micro chez Nino, qui met en évidence des dimensions génériques de l'adaptation du système didactique « classe de chimie » à l'introduction du cycle du carbone. Nous reviendrons sur des éléments plus spécifiques à ces trois études de cas dans les analyses micro développées dans le chapitre 10.

Secondement, le cas de Gauthier montre une évolution vers l'étude de la complexité avec l'insertion du cycle du carbone dans la séquence, moyennant une restructuration profonde de la séquence ordinaire. La mise en perspective de ces deux études de cas illustre le champ des possibles de l'étude de la complexité que permet le cycle du carbone en classe de chimie au secondaire I, dans deux contextes francophones tels que la Suisse romande et la France.

### 9.2.1 Nino : un exemple de l'évolution de la fonction du modèle de la réaction chimique

#### 9.2.1.1 Extrait « l'électrolyse de l'eau » : un enseignement centré sur le modèle de la réaction chimique

##### 9.2.1.1.1 Présentation de l'extrait

Pour illustrer le cas de Nino, nous choisissons deux extraits issus de la phase 2. Le premier extrait intervient dans la première partie de la séance 2.

Enjeux de niveau N	Enjeux ou tâches de niveau N-1	Phases de l'action (étapes ou organisation pour atteindre l'enjeu)
Modélisation microscopique de l'électrolyse de l'eau : écriture et équilibre de l'équation de réaction <b>N3</b> [1h]	Modélisation microscopique de la réaction d'électrolyse de l'eau <b>N31</b> [13 :40 à 35 :43/ TdP 1 à 140]	Rappel des définitions de transformation physique et chimique <b>N31a</b> [13 :40 à 15 :00/ TdP 1 à 8]
		Modélisation de la réaction avec des Lego : écriture de l'équation de réaction <b>N31b</b> [15 :00 à 17 :00/ TdP 8 à 25]
		Mise en évidence de la conservation des atomes : équilibre de l'équation de réaction <b>N31c</b> [17 :00 à 21 :11/ TdP 25 à 87]
		Mise en relation de la transformation chimique (macro) et du modèle de la réaction chimique (micro) <b>N31d</b> [21 :11 à 25 :36/ TdP 87 à 125]
		Bilan écrit : définition de la réaction chimique, réactif, produit et principe de conservation <b>N31e</b> [25 :36 à 35 :43/ TdP 125 à 140]

Figure 86 : extrait du synopsis de la séance 2 — phase 2 chez Nino

Sur l'extrait du synopsis de séance ci-dessus (Figure 86), nous choisissons de ne pas rapporter la dernière colonne correspondant aux micro-événements significatifs afin de ne pas surcharger le tableau. Les synopsis de séances complets sont toutefois disponibles en annexe (cf. annexe 110). L'extrait des interactions sur lequel portent les analyses est isolé et reporté ci-après (Extrait 5).

À ce moment de la séance 2, Nino est assis au milieu des élèves. Il a disposé les briques de Lego® sur une table devant lui afin de représenter l'équilibre de l'équation de réaction de l'électrolyse de l'eau (Figure 87). Dans cette représentation, une brique bleue modélise un atome d'hydrogène, et une brique rouge, un atome d'oxygène. Les briques sont assemblées entre elles de façon à représenter des molécules.



Figure 87 : Nino représente l'équation de réaction d'électrolyse de l'eau par des briques de Lego®

Une fois l'équation rédigée, il évoque l'expérience d'électrolyse de l'eau réalisée au cours de la séance précédente (Figure 88). Il cherche alors à mettre en relation le phénomène (la réalité perçue) et le modèle microscopique (phase de l'action N31d).



Figure 88 : Nino rappelle les différences de volumes de gaz produits dans les cuves à électrolyse

Cette phase de l'action est également présente dans la séquence ordinaire de Nino (phase de l'action N14b) (Figure 89).

Enjeux de niveau N	Enjeux ou tâches de niveau N-1	Phases de l'action (étapes ou organisation pour atteindre l'enjeu)
Etude de la réaction d'électrolyse de l'eau : approche macroscopique puis modélisation microscopique, définition de réaction, réactif et produit, transformation chimique N1 [31min]	Définition des concepts N14 [31 :23 à 35 :42 / TdP 259 à 281]	Définitions : équation de réaction, réactif, produit N14a [31 :23 à 32 :60 / TdP 259 à 260]
		Mise en relation des niveaux macroscopique et microscopique N14b [32 :37 à 33 :48 / TdP 261 à 277]
		Définition microscopique de la transformation chimique N14c [33 :48 à 35 :42 / TdP 277 à 281]

Figure 89 : extrait du synopsis de la séance 1 — phase 1 chez Nino

En effet, l'interprétation de l'expérience d'électrolyse de l'eau permet à Nino d'introduire les concepts et les modèles dans les deux séquences. Nous choisissons de développer un extrait significatif en phase 2, car il permet de mieux illustrer l'enjeu de cette partie de la séquence (Extrait 5).

87) Ens: c'est un petit peu ça l'idée il faut 2 h<sub>2</sub>o et puis avec ces deux h<sub>2</sub>o vous allez former deux h<sub>2</sub> et un o<sub>2</sub> j'aimerais juste revenir à ce que vous avez observé la semaine dernière E14 je suis à toi tout de suite (E1 4 lève la main) / vous vous souvenez en fait que dans les cuves ça descendait pas tout à fait de la même façon (fait un signe de niveaux différents avec les mains)

88) E13 : heu pas les XX non

89) Ens: pas dans les tours

90) E13 : ah

91) Ens: ça les fait pas tout à fait de la même façon E13

92) E13 : oui mais

93) Ens : E13

94) E13 : oui mais je sais pas je crois que vous avez pas précisé au début donc j'ai pensé à ça

95) Ens: bon, / en l'occurrence dans quel de quel côté vous aviez l'hydrogène/

96) Els (pls en même temps): heu c'était pas heu à gauche

97) Ens: là où ça descendait le plus ou là où ça descendait le moins,

98) E19 : ah bah là où

99) Ens: ben regardez ici (pointe l'équation écrite sur la table à l'aide des Lego) / regardez ici de quel côté vous avez le plus combien de fois plus, E114 combien de fois plus,

100) E114 : heu deux fois

101) Ens: deux fois plus

102) El-En: pourquoi deux fois plus,

103) E1 9 : ben parce que là t'as un et là t'as deux (montre les briques bleues)

104) Ens: ben regarde // et c'est pas beau, en fait

105) El-En: non c'est moche là je comprends pas

106) Ens: (rire) / alors vous savez que si vous partez avec ça (montre le réactif) vous allez obtenir ça (montre les molécules de h<sub>2</sub>) dans cette quantité dans ce volume si tu veux, et ça dans cette quantité ou ce volume,

107) El-En: ok non mais déjà pour commencer depuis le début on peut enlever juste un des Lego bleu et un des trois aussi ça

108) Ens: oui (enlève les Lego pour avoir l'équation non équilibrée)

109) El-En: le truc c'est que on a un seul Lego rouge et deux Lego bleus pourquoi là y'en a deux de rouges (*pointe la molécule de o2*)

110) El8 : ben justement parce que

111) El9 : ah c'est pas le même truc t'as pas une molécule de h2o /

112) Ens: ce qui est vrai↑ / tu peux prendre autant que tu veux

113) El-En: oui ben pourquoi on met pas on

114) Ens: si j'avais qu'une molécule comme ceci (*h2o*) j'aurais de la peine à former ça (*pointe les produits*) tu y arriverais pas↓ et puis avoir une molécule c'est difficile j'vous le dis / donc tu vois↑ ça c'est qu'une question d'équilibre / je sais que si je prends toutes si je prends 1 litre d'eau alors je hum je peux prendre 1 litre et demi d'eau je sais qu'avec ce 1 litre et demi d'eau je vais former 1 litre de h2 pardon (*remet les Lego sur la table pour équilibrer l'équation*) et un demi litre de o2↓ /

115) El-En: un demi litre↑

116) El?: ben oui parce que

117) Ens : oui

118) El-En: ah oui y'a pas les deux rouges

119) Ens: tu vois↑ c'est qu'une question de volume mais là on est au niveau moléculaire là vous avez une explication alors l'idée El-Am vient de le faire elle vient d'équilibrer en fait une équation au niveau moléculaire / mais de quelques chose qu'elle observe au niveau macroscopique / au niveau macroscopique c'que vous observez c'est ça (*enlève une molécule de h2o et une de h2 sur la table*) / d'accord↑ en réalité vous allez même observer d'avantage (*ajoute une molécule de h2 du côté des produits*) puisque c'que vous observez c'était plus de volume ici que de là (*de o2*) en fait vous l'avez observé ceci / vous n'en étiez pas conscients, mais c'est vrai que moi si j'intervertis les pôles du générateur ça descend plus de l'autre côté d'accord

*Extrait 5: « l'électrolyse de l'eau » Nino — phase 2 — séance 2 [21 :15 à 24 :00]*

#### 9.2.1.1.2 Éléments de la relation contrat didactique-milieu

*Étant donnée la longueur de l'extrait significatif dont il est question ici, la section des analyses est structurée en deux parties. Nous présentons tout d'abord l'analyse complète de la relation contrat didactique-milieu outillée par le triplet de genèses, puis nous proposons un paragraphe de résumé de ces analyses, en gras dans le texte. Le résumé fait fonction d'étape pour guider le lecteur ou la lectrice qui souhaiterait poursuivre vers les interprétations sans s'engager dans la lecture des analyses extensives. Les analyses des trois autres extraits présentés dans ce chapitre suivent la même organisation.*

Dans cet extrait, le milieu est d'abord composé d'objets matériels et symboliques : les briques de Lego® qui représentent la molécule réactive (l'eau) et les molécules produites (le dioxygène et le dihydrogène) mises en jeu dans la réaction d'électrolyse et l'équation de réaction précédemment rédigée à la craie sur la table — sous les briques de Lego® — par une élève.

Au début de l'extrait, l'enseignant se place en posture de surplomb et définit la situation. Il propose ainsi une lecture microscopique de l'équation de réaction chimique en pointant les briques correspondant à

chaque molécule évoquée. Puis il fait appel à la mémoire didactique en convoquant l'expérience d'électrolyse de l'eau réalisée au cours de la séance précédente. Avec cette référence au phénomène expérimental, Nino cherche à mettre en relation la réalité idéalisée et le modèle microscopique. En rendant les élèves responsables de l'identification des gaz présents dans les deux cuves de l'électrolyse, l'un présentant le double du volume de l'autre, il dévolue la modélisation du phénomène expérimental aux élèves.

Les élèves ont dans un premier temps des difficultés à se remémorer l'expérience — ou à comprendre ce à quoi l'enseignant fait référence —, Nino se positionne alors temporairement en posture d'accompagnement et mentionne la production de gaz dihydrogène, en demandant dans quelle cuve celui-ci était produit. Cet élément apporté au milieu didactique vient soutenir la mémoire didactique et permet aux élèves de produire un trait pertinent en rapportant que le gaz dihydrogène était produit dans la cuve de gauche. L'enseignant s'appuie sur ce trait pertinent et prolonge sa posture d'accompagnement pour permettre aux élèves de mettre en relation le volume de gaz dans la cuve à électrolyse et l'équation microscopique de la réaction. Pour cela il interpelle directement E14 en lui demandant d'explicitier le rapport des volumes de gaz produits, à partir de la lecture de l'équation de réaction représentée par les briques de Lego®. En effet, il y a deux fois plus de briques bleues que de briques rouges sur la table. E19 et E110 prennent la responsabilité de cette interprétation et accélèrent le temps didactique en explicitant la modélisation de la réalité idéalisée au niveau macroscopique à E14 qui manifeste son incompréhension : « pourquoi deux fois plus ». L'enseignant repasse alors en posture de surplomb pour instituer le modèle macroscopique introduit dans le milieu par E19 et E110, puis suggérer une transition vers le modèle microscopique.

Pour cela, il s'appuie de nouveau sur les briques de Lego® présentes devant lui. À cet instant, l'équation représentée par les briques est équilibrée (Figure 88). E14 demande à l'enseignant d'enlever une molécule de dihydrogène et une molécule d'eau pour revenir temporairement à l'équation non équilibrée rendant simplement compte des molécules de réactif et de produits. Elle ralentit alors le temps didactique. Nino se positionne en retrait et E19 prend la responsabilité d'identifier que l'équilibre doit concerner les briques rouges. Les atomes d'oxygène sont en effet un du côté des réactifs et deux du côté des produits. Cette remarque fait avancer le temps didactique et permet à E19 de formuler la nécessité d'avoir plusieurs molécules d'eau du côté des réactifs. L'enseignant institue cette proposition en indiquant « tu peux prendre autant que tu veux ». Les élèves manifestent de l'incompréhension après cette indication de Nino. Leur confusion prend probablement sa source dans la dualité macro-micro de l'équation de réaction (Kermen, 2018) à ce moment précis de l'extrait. En effet, le raisonnement de E14 mobilisait jusque-là le niveau microscopique du modèle et se restreignait donc aux molécules représentées sur la table. Lorsque l'enseignant l'invite à mobiliser autant de molécules qu'elle le souhaite en faisant le lien avec la modélisation macroscopique de l'équation de réaction, nous observons une sorte de rupture de contrat.

Pour rendre ce lien plus explicite, face à l'incertitude des élèves, Nino se place en posture de surplomb et réinterprète la situation en termes de molécules consommées et produites, puis en termes de volumes de gaz consommés et produits. Ceci permet à E14 de mettre en relation le modèle macroscopique (les volumes de gaz produits observés dans les cuves) et le modèle microscopique (deux briques rouges pour une brique bleue). L'enseignant conclut en posture de surplomb en instituant l'équation de réaction

microscopique équilibrée et son rôle pour interpréter « au niveau moléculaire » le phénomène expérimental, en particulier savoir quel gaz est produit dans quelle cuve en fonction du volume produit.

**Pour résumer, dans cet extrait, Nino veut mettre en évidence le rôle de l'équation de réaction chimique comme représentation du phénomène expérimental. La lecture de l'équation est d'abord microscopique et mobilise des objets matériels : des briques de Lego® représentant chaque atome. Cette représentation matérielle est complétée par l'écriture de l'équation de réaction à la craie sur le bureau pour mettre en correspondance l'assemblage des briques de couleurs avec la formule chimique des molécules qu'elle représente. Nino demande alors aux élèves d'associer ces éléments symboliques au phénomène observé au cours de l'expérience d'électrolyse de l'eau, en particulier les proportions de gaz produits par la réaction. Le raisonnement s'appuie transitoirement sur une lecture macroscopique de l'équation de réaction, qui se juxtapose au niveau microscopique du modèle mis en place sur le bureau via les Lego® et les coefficients stœchiométriques qui leur sont associés.**

#### 9.2.1.1.3 Interprétations

Le modèle épistémologique de savoirs décrit par Kermen (2018) préconise une interprétation des transformations chimiques par le modèle de la réaction chimique, du niveau expérimental vers le niveau du modèle macroscopique, puis microscopique. Nous observons dans cet extrait une interprétation de la réalité idéalisée — au niveau expérimental — par le modèle microscopique directement.

En effet, Nino demande aux élèves de mettre en relation les différences de volumes de gaz produits par la réaction d'électrolyse de l'eau avec l'équation de réaction chimique représentée comme un changement de molécules — elles-mêmes modélisées par des briques de Lego®. Cette lecture microscopique de l'équation de réaction freine E14 dans son interprétation de la réalité perçue. En premier lieu, elle ne parvient pas à saisir la dualité macro-micro associée à la formule chimique «  $H_2O$  », qui représente à la fois l'espèce chimique réactive et les molécules qui la composent. La lecture exclusivement microscopique de l'équation de réaction qui ne se détache pas des modèles de molécules présentes sur la table empêche cette élève d'appliquer le principe de conservation de la matière afin d'équilibrer l'équation. Elle n'envisage pas la possibilité d'ajouter une deuxième molécule de réactifs, tout simplement parce que son raisonnement est soutenu par les modèles matériels présents dans le milieu et qu'à ce moment de l'extrait, aucune autre molécule d'eau n'est représentée. L'enseignant doit alors prendre en charge la mise en évidence de la double signification de la formule chimique.

Cet extrait est assez significatif de la fonction des enseignements de chimie en 11<sup>e</sup> LS selon Nino : le modèle doit permettre d'interpréter des situations et de leur fournir un socle de connaissances nécessaire pour la poursuite de leur formation en chimie au collège (secondaire II). À cette fin, Nino alterne des postures d'accompagnement et de surplomb et dévolue aux élèves la responsabilité de mise en relation des différents niveaux du modèle, de sorte qu'elles et ils participent activement à la co-construction de savoirs exclusivement disciplinaires. Ces éléments apparaissent également dans notre étude du rapport au savoir de cet enseignant.

#### 9.2.1.1.4 Éléments du rapport au savoir de l'enseignant

Au cours de l'entretien *ante*-observations de la séquence ordinaire (phase 1), Nino verbalise les principaux objectifs d'enseignement-apprentissage qui ont orienté sa séquence : savoir équilibrer une équation de réaction et modéliser un phénomène expérimental. Il émet des réserves quant à la capacité

réelle des élèves à interpréter les phénomènes, c'est-à-dire à mettre en relation le niveau de réalité perçue et le niveau du modèle, à l'issue de cette séquence (Extrait 6).

64) Ens: mon objectif principal c'était qu'ils aient une première vue de ces équations chimiques auxquelles ils seront confrontés par la suite heu la plupart des élèves vont au collège alors c'est clair que dès l'année prochaine ils vont ils vont en faire hum le fait de de le fait de leur d'aborder pour une première fois ces équations et puis de d'illustrer avec avec quelques exemples et puis de montrer que l'équation peut souvent expliquer heu c'que l'on observe moi j'ai j'ai je je trouve heu j'trouve ça j'trouve ça important heu à mon avis quand ils reverront ces équations ils se souviendront quand même effectivement on peut les équilibrer c'est assez facile j'suis pas certain qu'ils aient qu'ils aient bien le hum qu'ils aient bien compris le le le le principe de de de de prédictibilité en fait, mais hum, mais voilà je je au moins on le d on le dit souvent moi je je je mets une petite graine et puis on regarde un petit peu c'que c'que ça va donner

*Extrait 6: extrait de l'entretien post-observations avec Nino (phase 1) [06 : 54 à 07 : 42]*

Pourtant, plusieurs moments de sa séquence ordinaire sont orientés vers ces objectifs. Moments que nous retrouvons également dans l'extrait significatif « l'électrolyse de l'eau » que nous venons d'analyser à l'échelle micro, issu de la phase 2 d'observations (Extrait 5). La confrontation du discours de Nino en entretien et de moments de sa pratique confirme ses intentions vis-à-vis de l'enseignement de la chimie au secondaire I.

Pour Nino, la séquence à propos des transformations chimiques consiste en une initiation aux modèles de la discipline, indispensable pour préparer les élèves qui se destinent au collège<sup>88</sup> (la majorité des 11<sup>es</sup> LS). Cette initiation consiste non seulement en la maîtrise du langage de la chimie (savoir écrire et équilibrer une équation de réaction), mais aussi à l'usage de ces outils au service de la modélisation.

Cette orientation de la séquence vers l'appropriation du modèle de la réaction chimique se retrouve dans l'étude de l'extrait « l'électrolyse de l'eau » à partir de la notion de configurations didactiques.

#### *9.2.1.1.5 Discussion des configurations didactiques*

Dans l'extrait « l'électrolyse de l'eau », le savoir peut être qualifié d'universel (Simonneaux, 2011, p. 91) et la posture épistémologique de Nino de scientifique (Simonneaux, 2011, p. 117). En effet, l'enjeu d'enseignement-apprentissage se centre ici sur la transmission du modèle de la réaction chimique pour interpréter un phénomène de transformation de la matière. La stratégie didactique alors observée oscille entre historique/doctrinale et problématisante et s'organise selon les modalités d'un « cours dialogué » (Hersant, 2004).

Au cours de l'extrait, Nino interagit avec les élèves pour élaborer la modélisation de la situation expérimentale observée au cours de la séance précédente à l'aide des modèles disposés sur la table (briques de couleurs qui représentent des atomes). Le problème élaboré au cours de ces échanges est

---

<sup>88</sup> Appellation des établissements du secondaire supérieur dans le canton de Genève, ceux du secondaire inférieur sont nommés « cycle d'orientation » ou « cycle ».



9.2.1.2 Extrait « réaction chimique et anthropocène » : quand le modèle de la réaction chimique permet de penser un problème complexe

9.2.1.2.1 Présentation de l'extrait

Le deuxième extrait intervient également au cours de la phase 2, à la fin de la séance 3 (Figure 91).

Enjeux de niveau N	Enjeux ou tâches de niveau N-1	Phases de l'action (étapes ou organisation pour atteindre l'enjeu)
Etudes de combustions en jeu dans le cycle du carbone : écriture de l'équation de réaction et lien avec les questions environnementales <b>N5</b> [1h07min20]	Introduction <b>N51</b> [02 :08 à 12 :30/ TdP 1 à ]	Présentation des objectifs de la séance <b>N51a</b> [02 :08 à 11 :35/ TdP 1]
		Rappel sur les réactions de combustion et conservation de la masse <b>N51b</b> [11 :35 à 12 :30 / TdP 1]
	Etude du modèle du cycle du carbone : introduction des questions environnementales liées aux activités humaines <b>N52</b> [12 :30 à 18 :00/ TdP 1 à 56]	Présentation du cycle du carbone <b>N52a</b> [12 :30 à 13 :52/ TdP 1 à 17]
		Interprétation macroscopique des flèches du cycles <b>N52b</b> [13 :52 à 15 :30/ TdP 18 à 35]
		Quantification des différentes flèches : introduction des questions environnementales <b>N52c</b> [15 :30 à 18 :00/ TdP 35 à 56]
	Etude de la combustion du charbon <b>N53</b> [18 :00 à 34 :13/ TdP 56 à 167]	Rappel sur la combustion <b>N53a</b> [18 :00 à 21 :31/ TdP 56 à 75]
		Réalisation de l'expérience de combustion du charbon dans le dioxygène <b>N53b</b> [21 :31 à 30 :35/ TdP 76 à 135]
		Identification du produit de la réaction <b>N53c</b> [30 :35 à 32 :44/ TdP 135 à 153]
		Modélisation de la transformation par l'équation de réaction chimique : rappel des concepts de réactif et produit <b>N53d</b> [32 :44 à 34 :13/ TdP 153 à 167]
	Etude des combustions du méthane et du butane <b>N54</b> [34 :51 à 54 :10 / TdP 167 à 280]	Mise en relation des modèles du cycle du carbone et de la réaction chimique <b>N53e</b> [34 :13 à 34 :51/ TdP 167]
		Réalisation de l'expérience de combustion du méthane <b>N54a</b> [34 :51 à 37 :41/ TdP 167 à 197]
		Modélisation de la transformation par l'équation de réaction chimique <b>N54b</b> [37 :41 à 42 :36/ TdP 198 à 248]
		Identification macroscopique du produit de la réaction <b>N54c</b> [42 :36 à 43 :23/ TdP 248 à 254]
		Mise en relation des modèles du cycle du carbone et de la transformation chimique <b>N54d</b> [43 :23 à 49 :06/ TdP 254]
		Rédaction du bilan écrit <b>N54e</b> [49 :06 à 52 :00/ TdP 254 à 268]
	Etude des réactions de combustion de respiration et photosynthèse <b>N55</b> [52 :00 à 01 :09 :30 / 268 à 429]	Démonstration (vidéo) de l'expérience de combustion du butane <b>N54f</b> [52 :00 à 54 :10 / 268 à 280]
		Etude de la réaction de respiration animale <b>N55a</b> [54 :10 à 59 :00 / 280 à 342]
		Etude des réactions de respiration végétale et de photosynthèse <b>N55b</b> [59 :00 à 01 :03 :00/ 343 à 400]
	Mise en relation des modèles du cycle du carbone et de la réaction chimique : lien avec les questions environnementales <b>N55c</b> [01 :03 :00 à 01 :09 :30/ 400 à 429]	

Figure 91 : extrait du synopsis de la séance 3 — phase 2 chez Nino

Ici encore nous choisissons de simplifier l'extrait de synopsis en ne faisant pas figurer la colonne des événements significatifs de sorte à ne pas surcharger le tableau. Sa fonction est surtout de montrer l'enchaînement des phases de l'action jusqu'à l'étude des questions environnementales (phase N55c). L'extrait sur lequel portent nos analyses (Extrait 7) concerne cette phase de l'action.

405) Ens: je reviens à ça hé ici vous avez c'qu'on appelle le cycle du carbone donc de l'atome de C vous voyez que le C vous en avez ici au départ (*montre la lithosphère*) là aussi avec le pétrole vous avez aussi le C qui est ici (*montre l'atmosphère*) le C qui est ici (*montre la formule de la photosynthèse*) le C qui va être récupéré; d'accord; maintenant ce qui m'intéresse c'est la chose suivante; / le problème c'est que vous l'avez soulevé avant c'est qu'on produit énormément de ce gaz carbonique ok; de plus en plus ok le problème c'est que ici vous avez ces végétaux qui on de plus en plus de peine à le récupérer pour quelle raison ont-ils de plus en plus de peine à le récupérer; pas parce qu'ils sont moins efficaces

406) E114 : parce qu'y en a trop‡  
407) Ens: parce que y'en a beaucoup et puis parce que surtout ça (*montre les arbres*)  
408) Els: y'en a moins  
409) Ens: y'en a moins‡ donc c'est effectivement si vous commencez à brûler ces forêts-là ben vous les placez ici (*montre la flèche correspondant à la combustion liée à la déforestation*) puis elles produisent‡ d'accord‡

*Extrait 7: « réaction chimique et anthropocène » Nino — phase 2 — séance 3 [01 :03 :00 à 01 :04 :00]*

Il intervient dans l'enjeu 55, juste après la modélisation des réactions de respiration — animale (N55a) et végétale — et de photosynthèse (N55b). Cet enjeu est lui-même précédé de la modélisation de la combustion du charbon (N53) et du méthane (N54). À l'issue de chacun de ces enjeux, l'équation de réaction qui vient d'être rédigée est reportée sur le cycle du carbone (N53e et N54e), ce dernier étant présenté au début de la séance (N52). La phase de l'action N55c est donc l'occasion de revenir sur un cycle du carbone dont chacune des flèches a été modélisée comme une réaction chimique à laquelle on a associé une équation de réaction.

#### *9.2.1.2.2 Éléments de la relation contrat didactique-milieu*

Dans cet extrait, Nino est majoritairement en posture de surplomb. On constate également qu'il occupe un temps de parole conséquent par rapport à celui accordé aux élèves.

Le milieu est constitué d'un élément symbolique : le cycle du carbone projeté au tableau sur lequel l'enseignant a indiqué les équations de réaction au fil de la séance. L'enseignant est alors responsable de la mise en relation des modèles biologique, géologique et chimique. Dans son discours il prend en charge la conservation de l'élément carbone à travers les différents compartiments du cycle, il propose alors une modélisation microscopique des transformations chimiques reliant les compartiments.

Puis, il bascule dans un raisonnement sur les quantités, mobilisant le niveau macroscopique du modèle. Cette réflexion vise à confier aux élèves la responsabilité d'identifier l'origine de l'augmentation du dioxyde de carbone atmosphérique, à savoir les activités anthropiques industrielles. E114 saisit cette responsabilité en indiquant que la photosynthèse ne peut plus compenser les phénomènes de combustions, car la quantité de dioxyde de carbone qu'ils produisent est trop importante. Il fait alors avancer le temps didactique.

Nino se place temporairement en posture d'accompagnement pour faire avancer le raisonnement d'E114 vers une autre conséquence des activités industrielles : la déforestation. Pour cela, il pointe les icônes représentant des arbres sur le cycle du carbone en interrogeant E114 à leur sujet. Plusieurs élèves répondent de concert qu'il y a de moins en moins d'arbres, avançant de nouveau la progression du temps didactique. L'enseignant retrouve sa posture de surplomb initiale pour instituer ces apports au milieu didactique et conclure quant au lien entre activités anthropiques industrielles et déséquilibre du cycle du carbone. Ce raisonnement repose sur le principe de conservation de la matière, rappelé au début de cet extrait, en particulier sur le fait que le cycle du carbone est un cycle fermé qui conserve l'élément carbone à travers différentes substances, stockées dans différents compartiments (lithosphère, hydrosphère, atmosphère, biosphère). Ainsi, Nino met en évidence à travers son discours que la déforestation déplace une source d'absorption du dioxyde de carbone atmosphérique — la

photosynthèse — vers une source de production du dioxyde de carbone dans l’atmosphère à travers la combustion des arbres. Il accompagne cette explication de gestes qui précisent le changement de flèche dans le cycle du carbone causé par la déforestation : d’une flèche verte de l’atmosphère vers la biosphère à une flèche rouge réalisant le parcours inverse (Figure 92).



Figure 92 : Nino explique les effets de la déforestation en pointant les flèches représentant la photosynthèse (haut) et la combustion des arbres (bas) sur le cycle du carbone

**Pour résumer, dans cet extrait, l’enjeu consiste à mettre en relation le cycle du carbone avec le principe de conservation de la matière pour comprendre l’origine anthropique du réchauffement climatique. Nino est majoritairement en posture surplombante et commence par décrire la conservation de l’élément carbone à travers les compartiments du cycle (niveau microscopique du modèle). Dans un deuxième temps, il bascule dans une modélisation macroscopique des phénomènes en demandant aux élèves de raisonner sur les quantités de dioxyde de carbone produites et consommées dans l’atmosphère. El14 se place comme un élève chronogène en mettant en perspective les quantités de dioxyde de carbone produites par les combustions d’origine industrielle et celles consommées par la photosynthèse. Ce constat permet à Nino de conclure sur les effets de la déforestation sur la photosynthèse, et donc sur les quantités de dioxyde de carbone atmosphérique.**

#### 9.2.1.2.3 Interprétations

L’analyse à l’échelle micro de cet extrait significatif montre, du point de vue de la topogenèse, la faible marge de responsabilité accordée aux élèves. En effet, si le raisonnement repose sur différents modèles élaborés précédemment — le cycle du carbone, le principe de conservation des atomes, les combustions —, ce qui profile une approche de la complexité du problème mis à l’étude — l’origine anthropique du dioxyde de carbone atmosphérique —, Nino garde l’entière responsabilité de leur mise en relation. Du point de vue de la mésogenèse, c’est lui qui introduit les modèles dans le milieu. Si le temps didactique

avance en cette fin de séance 3, nous nous interrogeons sur une réelle co-construction du problème environnemental étudié ici et donc sur l'implication des élèves dans l'étude de la complexité.

Cependant, ces choix de mise en œuvre ne sont pas étonnants vis-à-vis des objectifs de la séquence formulés par Nino au cours des entretiens *ante-observations* de la phase 2. Cet enseignant considère en effet le cycle du carbone comme une « application pratique » qui permet d'illustrer le principe de conservation de la matière, tout en sensibilisant les élèves au problème du réchauffement climatique. Nous retrouvons ces éléments dans l'analyse du rapport au savoir de Nino qui concerne plus particulièrement le cycle du carbone.

#### 9.2.1.2.4 *Éléments du rapport au savoir de l'enseignant*

Au cours du premier entretien de préparation de la phase 2 — au cours duquel nous proposons à Nino d'utiliser le cycle du carbone dans sa séquence à propos des transformations chimiques (cf. 7.3.2.2) —, l'enseignant réfléchit aux modalités d'intégration de cet objet en regard de ses objectifs d'enseignement-apprentissage. À ce stade, ceux-ci restent clairement centrés sur l'appropriation du modèle de la réaction chimique, qu'il essentialise à la capacité des élèves à rédiger les équations de réaction. Cette centration sur le modèle de la chimie se retrouve dans son discours au cours du deuxième entretien de préparation, quelques semaines plus tard. Au cours de cet entretien, Nino nous présente la nouvelle séquence qu'il a conçue, dans laquelle le cycle du carbone intervient en séance 3, pour « illustrer », « appliquer » les concepts et modèles de la chimie introduits au cours des deux séances précédentes (Extrait 8).

905) Ch : parce que toi du coup l'enjeu du schéma là l'enjeu principal c'est quoi selon toi « fin toi tu qu'est-ce que t'y mets dans ce schéma pourquoi c'est important  
906) Ens: le le schéma du carbone†  
907) Ch : ouais  
908) Ens: heu ça permet d'illustrer / heu c'est l'application pour moi pour moi c'est une application pratique

*Extrait 8: extrait de l'entretien ante-observations 2 avec Nino (phase 2) [01 :15 :23 à 01 :15 :36]*

Toutefois, l'effacement des enjeux relatifs à l'étude des questions environnementales qui apparaît dans le discours de Nino en entretien (Extrait 9) est nuancé par l'étude de sa pratique.

367) Ens: alors on commence une introduction / donc sur l'un de ces deux schémas /// ou sur les deux si l'idée c'est le hum quel est quel est l'objectif en fait c'est de c'est l'objectif est-ce que c'est de les sensibiliser on peut† tu me parlais c'est vrai au niveau des quantités voilà l'évolution de quantités depuis qu'y a l'Homme / donc on rajoute de plus tu me parlais de temporalité effectivement on peut on peut faire aussi toute une tout un rajouter une chose sur les sur la hum l'augmentation des quantités // mais ça c'est / c'est une c'est pas très long parce que l'objectif pour moi c'est de faire c'est de faire ceci (*pointe ses notes avec les équations de réaction*) clairement donc, mais ça on pourra en parler  
368) Ch : ça c'est des éléments de contexte en fait tu vois†  
369) Ens: tout à fait / mais on peut bien sûr on peut le montrer on peut le mentionner //

370) Ch : moi je suis assez d'accord que la comparaison elle permet de mettre en avant  
 371) Ens: voilà  
 372) Ch : le rôle des activités humaines  
 373) Ens: voilà dans c'est juste une sensibilisation, ok moi ça m'va ensuite passer directement au niveau du micro

Extrait 9: extrait de l'entretien ante-observations 1 avec Nino (phase 2) [25 : 38 à 26 : 38]

Dans les faits, la comparaison des deux représentations du cycle du carbone — holocène et anthropocène — au cours de la phase de l'action N52c permet un premier raisonnement sur les quantités de dioxyde de carbone consommées et produites avant et après la révolution industrielle. Cette modélisation du point de vue de la biologie et de la géologie est interprétée dans le cadre des modèles de la chimie au cours des phases de l'action N53, N54 et N55 (cf. Figure 74), jusqu'à la conclusion de Nino sur les effets de la déforestation sur l'augmentation du dioxyde de carbone atmosphérique. Tout se passe comme si le modèle du cycle du carbone mis en relation avec le modèle de la réaction chimique convoquait la réflexion sur les conséquences des activités anthropiques industrielles sur l'environnement, malgré les intentions verbalisées par l'enseignant quant aux objectifs de la séance. La notion de configurations didactiques de Simonneaux (2011) nous permet de discuter ces résultats.

#### 9.2.1.2.5 Discussion des configurations didactiques

Dans l'extrait « réaction chimique et anthropocène », les savoirs sont pluriels, car ils font référence à plusieurs modèles disciplinaires (Simonneaux, 2011, p. 91). D'après Simonneaux (2011), la posture épistémologique de Nino peut être qualifiée de réaliste critique (p. 117) et la stratégie didactique employée de problématisante (p. 144). La configuration didactique alors reconstruite à partir de cet extrait correspond à la configuration problématisante (Simonneaux, 2011, p. 149). L'enseignant oriente la séance vers la construction d'un problème en impliquant activement les élèves (Figure 93).

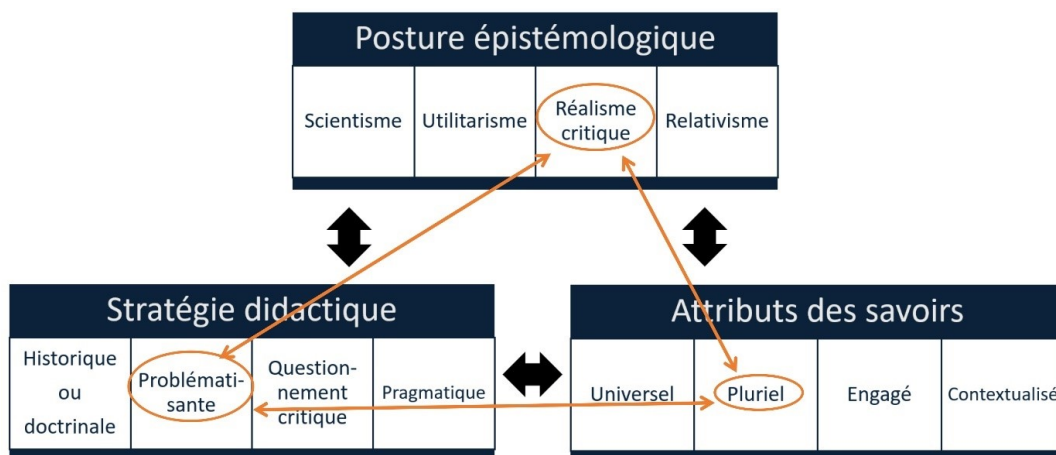


Figure 93 : configuration didactique reconstruite à partir de l'extrait « réaction chimique et anthropocène »

En comparaison avec la configuration construite à partir de l'extrait « l'électrolyse de l'eau », nous observons avec l'entrée du cycle du carbone dans la séquence, un changement de posture épistémologique de la part de Nino, en regard de la complexité des savoirs à traiter. De hiérarchie, la

configuration didactique devient problématisante. Ainsi, le cycle du carbone joue son rôle de greffe en bousculant le fonctionnement du système didactique.

## 9.2.2 Gauthier : quand le cycle du carbone permet l'étude d'un problème complexe

### 9.2.2.1 Extrait « centrale thermique et réchauffement climatique » : étude de l'origine du dioxyde de carbone atmosphérique

Pour illustrer le cas de Gauthier, nous analysons un extrait de la phase 1 dans cette section, puis un extrait de la phase 2 dans la section suivante (cf. 9.2.2.2).

#### 9.2.2.1.1 Présentation de l'extrait

Le premier extrait que nous choisissons d'analyser est issu de la séance 4 de la séquence « Des problèmes environnementaux » de Gauthier. Nous rappelons que cette séquence intervient après une séquence entière consacrée à l'introduction du modèle de la réaction chimique et des concepts associés — « Des atomes et des molécules dans ma cuisine » — et qu'elle vise à réinvestir les savoirs de chimie et de physique enseignés jusqu'alors (cf. 9.1.3.2). Nous retrouvons peu d'enjeux relatifs à la chimie dans les deux premières séances de cette séquence, mais les séances 4 et 5 menées en demi-classe visent à modéliser le fonctionnement des centrales thermiques à travers la réaction de combustion du charbon et à mettre en évidence leurs conséquences sur l'environnement (enjeu N3) (Figure 94).

Enjeux de niveau N	Enjeux/tâche de niveau N-1	Phases de l'action (étapes ou organisation pour atteindre l'enjeu)
Etude de la combustion du charbon dans les centrales thermiques et effets sur l'environnement N3 [52min40]	Introduction des problèmes environnementaux liés au dioxyde de carbone N31 [02 :11 à 06 :01/ TdP 1 à 37]	Rappels sur le pH N31a [02 :11 à 02 :53 / TdP 1 à 7]
		Présentation des objectifs de la séance N31b [02 :53 à 04 :22 / TdP 7 à 11]
		Réflexion sur le réchauffement climatique N31c [04 :22 à 06 :01/ TdP 11 à 37]
	Etude macroscopique de la combustion du charbon N32 [06 :01 à 24 :43/ TdP 37 à 76]	Activité documentaire : interprétation du fonctionnement de la centrale thermique par la combustion du charbon N32a [06 :01 à 16 :28/ TdP 37 à 50]
		Modélisation de la transformation chimique : équation de réaction, identification des réactifs et des produits N32b [16 :28 à 18 :14/ TdP 50 à 74]
		Bilan des conversions d'énergies au cours de la réaction : schéma de la chaîne énergétique N32c [18 :14 à 24 :43 / TdP 74 à 76]
	Modélisation du fonctionnement de la centrale thermique par l'expérience de combustion du charbon N33 [24 :43 à 34 :02 / TdP 76 à 122]	Rappel sur le test à l'eau de chaux N33a [24 :43 à 27 :26/ TdP 76 à 84]
		Présentation de l'expérience N33b [27 :26 à 28 :37 / TdP 84 à 99]
		Réalisation de l'expérience N33c [28 :37 à 32 :30/ TdP 100 à 122]
		Rappel sur le test d'identification de l'eau N33d [32 :30 à 34 :02/ TdP 122 à 144]

Figure 94 : extrait du synopsis de la séance 4 — phase 1 — séquence « Des problèmes environnementaux » chez Gauthier

Dans le synopsis ci-dessus, la phase de l'action grisée concerne des savoirs de physique et n'est donc pas directement liée au processus d'enseignement-apprentissage de la chimie qui nous intéresse ici. Comme dans la section précédente, nous reportons un extrait allégé du synopsis de séance, qui ne présente pas la colonne des événements significatifs. Celui qui nous intéresse appartient à la phase de l'action N31c, relative à la réflexion sur l'origine anthropique du réchauffement climatique (Extrait 10), et intervient au début de la séance 4.

- 7) Ens: donc heu là l'idée ça va être de travailler sur le pH en petit peu heu, mais on va surtout travailler sur un gaz qui est produit par les usines qui est le
- 8) Els : le co2
- 9) Ens: ouais le co2 qu'on appelle aussi le
- 10) El1 : le dioxyde de carbone
- 11) Els : le co2
- 12) Ens: ouais le co2 qu'on appelle aussi le
- 13) El1 : le dioxyde de carbone
- 14) Ens: dioxyde de carbone, tout à fait / (*demande organisation - El-Ma distribue les feuilles*) alors est-ce que vous pouvez me rappeler heu les problèmes du dioxyde de carbone, (*pls éls lèvent la main*) / oui
- 15) El6 : c'est un gaz à effet de serre
- 16) Ens: c'est un gaz à effet de serre ça veut dire que
- 17) El6 : ben réchauffe la planète
- 18) Ens: ça quoi,
- 19) El6 : ça réchauffe la planète
- 20) Ens: ça réchauffe la planète
- 21) El6 : ben oui
- 22) Ens: ok j'avais entendu ça rejette la planète ça réchauffe la planète et comment ça réchauffe la planète, / tu t'appelles,
- 23) El 6 : y'a un gaz qui se forme heu au-dessus de la planète comme ça (*fait un geste circulaire avec la main*) et les rayons du soleil ils vont entrer et il pourront pas ressortir
- 24) Ens: d'accord donc ça se forme au-dessus de la au-dessus d'la couche / au-dessus de la planète, / il veut pas s'former heu sur ici /il veut pas se former au niveau d'la mer il se forme forcément en haut, / oui
- 25) El-Ma: à la base y'a déjà une couche
- 26) Ens: oui
- 27) El-Ma: mais à cause à cause à cause à cause
- 28) Ens: à cause à cause à cause de quoi,
- 29) El-Ma: et du coup en fait les rayons du soleil ils rentrent, mais ils ont du mal à sortir d'la planète du coup ils retapent dans la planète
- 30) Ens: d'accord et, mais c'est à cause de quoi, tu dis à cause, mais à cause de quoi, ouais, mais à cause de c'est à cause de quoi qu'y a du CO2
- 31) El-Ma: ah heu à cause de la pollution,
- 32) Ens: ok, mmh /
- 33) El?: des usines
- 34) Ens : pollution des usines pollution de quoi d'autre,
- 35) El2 : des voitures
- 36) Ens: des voitures
- 37) El1 : des vaches
- 38) Ens: des vaches ben ça c'est en moindre mesure hein / et puis c'est pas vraiment du dioxyde de carbone
- 39) El?: c'est de l'eau

40) Ens: non c'est du méthane et donc du coup / là nous on va s'intéresser aux usines / c'est bon, donc là on s'intéresse aux usines d'accord et on va essayer de comprendre ben c'quelles font, d'accord donc vous connaissez vous les usines heu de les centrales pardon

*Extrait 10: « centrale thermique et réchauffement climatique » Gauthier — phase 1 — séquence « Des problèmes environnementaux » — séance 3 [02 :53 à 06 :01]*

Nous voyons sur le synopsis de séance (Figure 94) que l'enjeu N31 auquel cet extrait appartient est suivi de l'étude macroscopique de la combustion du charbon (N32), puis la mise en œuvre expérimentale de cette transformation chimique (N33). Cependant, le problème environnemental exploré ensuite est celui de l'acidification des océans (N34), notamment vis-à-vis des conséquences de l'évolution du pH des milieux aquatiques pour les écosystèmes (N34c). Le retour sur le réchauffement climatique n'intervient qu'au niveau de l'enjeu N35, à travers l'explication du phénomène d'effet de serre par Gauthier.

#### 9.2.2.1.2 Éléments de la relation contrat didactique-milieu

Au début de l'extrait, le milieu matériel est composé du document de l'activité 6.3 « Dioxyde de carbone et environnement » qui est distribué aux élèves et projeté au tableau. Ce document présente notamment deux illustrations : un schéma qui aménage le cycle du carbone et le cycle de l'eau pour représenter l'origine des pluies acides (Figure 95) et une modélisation de l'effet de serre (Figure 96) (cf. annexe 53 pour voir l'activité au complet).

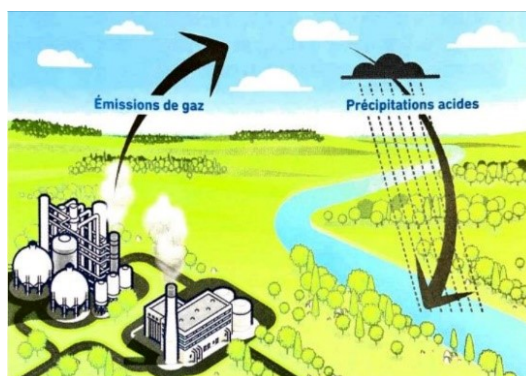


Figure 95 : cycle du carbone mettant en évidence le phénomène des pluies acides, extrait de l'activité 6.3 « Dioxyde de carbone et environnement » de Gauthier (phase 1)

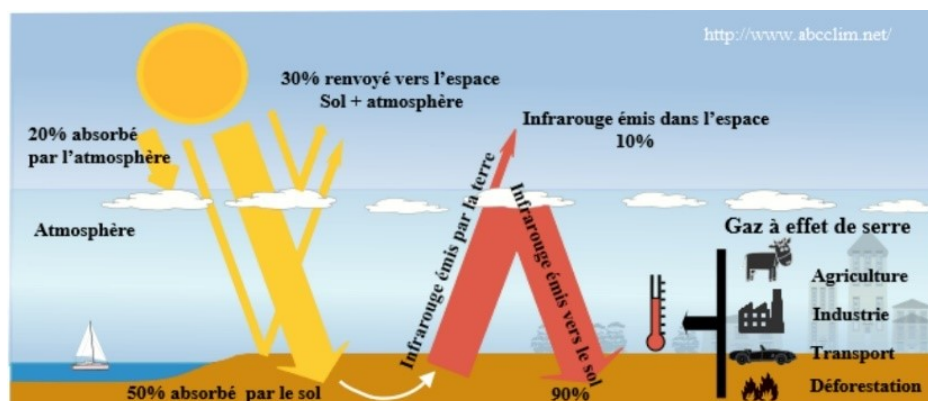


Figure 96 : modélisation de l'effet de serre, extrait de l'activité 6.3 « Dioxyde de carbone et environnement » de Gauthier (phase 1)

Gauthier est tout d'abord en posture de surplomb pour définir la situation et énoncer l'enjeu de la séance : comprendre les effets des centrales à charbon sur le climat à travers l'étude du gaz qu'elles produisent. Il utilise le niveau macroscopique du modèle et confie aux élèves la responsabilité d'identifier le gaz. L'information est présente dans le document qui vient de leur être distribué, en particulier dans le titre du schéma présentant le cycle du carbone : « Le dioxyde de carbone issu des centrales à charbon ». Les élèves se saisissent donc de cette responsabilité et font avancer le temps didactique en citant « le CO<sub>2</sub> ».

Gauthier se place en posture d'accompagnement pour faire émerger dans le milieu le nom associé à cette formule chimique, confiant de nouveau cette responsabilité aux élèves. E11 produit un trait pertinent en identifiant le dioxyde de carbone. Ce trait pertinent est immédiatement institué par l'enseignant qui continue de faire progresser le temps didactique. Jusqu'alors, le contexte nous permet de dire que les échanges se situent plutôt au niveau macroscopique du modèle : « un gaz produit par les usines » est modélisé comme étant « le dioxyde de carbone » ou « CO<sub>2</sub> ».

Gauthier reprend temporairement une posture de surplomb pour introduire les problèmes environnementaux dans le milieu. Toutefois, il confie la responsabilité aux élèves de définir le dioxyde de carbone comme gaz à effet de serre. Plusieurs élèves manifestent leur intention de prendre en charge cette responsabilité en levant la main. Gauthier donne la parole à E16 qui accélère le temps didactique en identifiant le dioxyde de carbone comme un GES.

L'enseignant, en posture d'accompagnement, demande d'explicitier le problème lié aux GES. E16 se saisit à nouveau de cette responsabilité et fournit un trait pertinent qui fait avancer le temps didactique : le lien entre GES et réchauffement climatique. Pour cela, il utilise une expression qui ne mobilise pas les concepts scientifiques : « ça réchauffe la planète ». Après institution de ce trait pertinent, Gauthier accompagne E16 vers l'explication de ce phénomène dans le registre de la physique. Cependant, E16 apporte dans le milieu un modèle quotidien — la conception du couvercle (Maron et al., 2022) — dont E17 se fait l'écho, ce qui ralentit la progression du savoir. L'enseignant, toujours en posture d'accompagnement, tente de réorienter le raisonnement de ces deux élèves vers les origines des GES. E17 occupe cette responsabilité en proposant un trait non pertinent pour la co-construction du savoir visé : « à cause de la pollution ». Le temps didactique stagne. Aussi, Gauthier n'institue pas cette proposition et attend que les élèves apportent d'autres éléments. Une élève évoque les usines. Cette proposition provoque une avancée du temps didactique. L'enseignant l'institue en reprenant le terme de pollution introduit dans le milieu précédemment pour mettre en évidence l'origine du problème environnemental : « la pollution des usines ». E12 puis E11 identifient alors respectivement « les voitures » et « les vaches » comme productrices de GES, certainement en s'appuyant sur les icônes qui figurent sur la modélisation de l'effet de serre (Figure 96). Ces deux traits pertinents font avancer le temps didactique.

Gauthier prend finalement une posture de surplomb pour instituer la réponse d'E12, mais nuancer la réponse de E11 en précisant que les vaches ne produisent pas du dioxyde de carbone, mais du méthane. Bien que le méthane soit également un GES, l'enseignant précise les contours du contrat didactique à travers cette intervention, à savoir que cette séance concerne l'étude des effets du dioxyde de carbone sur l'atmosphère.

**Pour résumer, dans cet extrait, Gauthier cherche à introduire le problème du réchauffement climatique. L'enjeu environnemental est abordé par la question du dioxyde de carbone produit**

**par les centrales à charbon. À ce stade de la séquence, le fonctionnement des centrales n'est pas encore modélisé comme une réaction de combustion — ce sera l'enjeu de la séance suivante — mais les documents de l'activité indiquent qu'elles produisent du dioxyde de carbone. El6 se positionne comme un élève chronogène en apportant dans le milieu le concept de gaz à effet de serre qui fait le lien entre le fonctionnement des centrales à charbon et le réchauffement climatique. Ainsi, Gauthier accompagne les élèves dans l'identification d'autres activités anthropiques productrices de gaz à effet de serre (les transports, l'agriculture, etc.).**

#### 9.2.2.1.3 *Interprétations*

Au cours de cet extrait, l'enjeu est orienté vers l'identification du rôle du dioxyde de carbone dans le phénomène d'effet de serre. Plusieurs modèles sont alors mis en relation : le cycle du carbone dont une représentation est proposée sur le document de l'activité (Figure 95), l'effet de serre (Figure 96) et la réaction de combustion du charbon (sous-enjeu N32a). À ce moment de la séance, ce dernier modèle est un implicite, car la modélisation du fonctionnement de la centrale à charbon comme une réaction de combustion intervient dans l'enjeu suivant (N32b).

Pour montrer aux élèves l'origine anthropique du réchauffement climatique, Gauthier introduit dans le milieu dès le début de l'extrait la question de la production du gaz dioxyde de carbone par les usines, sans détailler le phénomène qui en est à l'origine. Si les deux enjeux suivant cet extrait seront centrés sur la modélisation du fonctionnement de la centrale à charbon comme la combustion du carbone (N32 et N33), il semblerait toutefois que les phases de l'action dans lesquelles se déploient les enjeux N32 « Étude macroscopique de la combustion du charbon » et N33 « Modélisation du fonctionnement de la centrale thermique par l'expérience de combustion du charbon » accumulent des enjeux relatifs à des objectifs d'enseignement-apprentissage différents : comprendre le rôle des activités humaines dans l'effet de serre, modéliser un dispositif technologique comme une réaction chimique, mettre en œuvre expérimentalement une combustion, réaliser le test à l'eau de chaux, l'interpréter au niveau microscopique, conclure au niveau macroscopique. L'étude de la complexité semble se perdre à travers cette accumulation. Pourtant présente dans l'extrait en introduction de la séance que nous venons d'analyser grâce à la mise en perspective des différents modèles disciplinaires, elle s'évanouit dans sa réalisation. La séance semble en effet finalement s'orienter vers des enjeux spécifiques à la chimie (relatifs à la modélisation et à des compétences expérimentales). Le réchauffement climatique réapparaît au niveau de l'enjeu N35 à travers l'étude de l'effet de serre, sans que le lien avec le dioxyde de carbone produit par les centrales à charbon dans l'atmosphère soit rappelé. Pourtant, l'évaluation conçue par Gauthier en fin de séquence porte en partie sur la capacité des élèves à utiliser les modèles de savoirs spécifiques au service de l'étude d'un problème environnemental (complexe). Cet objectif d'enseignement-apprentissage apparaît dans l'étude du rapport au savoir « problèmes environnementaux » de l'enseignant.

#### 9.2.2.1.4 *Éléments du rapport au savoir de l'enseignant*

L'évaluation de cette séquence consiste en la présentation de différents problèmes environnementaux par les élèves, dans un format « classe renversée » (cf. 9.1.3.2). Au cours de l'entretien *post-observations*, Gauthier met l'accent sur l'objectif de problématisation des conséquences des activités anthropiques sur l'environnement. Bien qu'il évoque la compréhension de certains concepts/modèles disciplinaires comme l'effet de serre, l'enjeu d'enseignement-apprentissage de la séquence « Des problèmes environnementaux » semble se porter sur la compréhension du problème en lui-même.

Dans la mise en œuvre de la séquence, nous observons plusieurs moments de rappels des savoirs de physique et de chimie, utiles à l'appréhension des problèmes environnementaux. La modélisation des centrales à charbon à travers la combustion du carbone que nous introduisons dans l'analyse de l'extrait ci-dessus (Extrait 11) en est un exemple.

44) Ens : heu alors pour heu c'qui est de l'environnement ça a plutôt bien marché parce que quand on regarde les oraux effectivement ils ont bien réussi à faire les problématiques  
45) Ch : d'accord  
46) Ens: et heu et voilà globalement c'est assez bien compris même si heu voilà y'a c'est toujours heu des classes très hétérogènes donc heu ça reste heu on peut pas avoir réussi à capter tout le monde  
47) Ch : mmh  
48) Ens : mais en tout cas j'ai l'impression que cette heu cette problématique-là elle est plutôt bien passée même si les concepts certains concepts sont encore difficiles je sais que par exemple l'effet de serre ils ont du mal à à bien comprendre le concept

*Extrait 11: extrait de l'entretien post-observations de la séquence 6 « Des problèmes environnementaux » avec Gauthier (phase 1) [03 : 53 à 04 : 24]*

Pour Gauthier, évaluer les élèves à l'oral permet d'avoir accès aux concepts mobilisés derrière leurs discours. Il cherche ainsi à identifier les savoirs spécifiques qui soutiennent les problématiques présentées par les élèves. Ainsi, nous reconstruisons à partir de la confrontation du discours et des pratiques de cet enseignant un deuxième enjeu associé à l'enseignement-apprentissage des problèmes environnementaux en phase 1 : la compréhension des problèmes environnementaux soutenue par des concepts et modèles scientifiques.

Ceci n'est pas le cas dans la séquence d'introduction du modèle de la réaction chimique « Des atomes et des molécules dans ma cuisine ». Au cours de cette séquence, nous remarquons que Gauthier évoque les problèmes liés au dioxyde de carbone avec un seul groupe d'élèves, celui qu'il estime « fort ». Quand nous revenons sur ce constat au cours de l'entretien *post-observations*, l'enseignant précise son intention de faire avancer l'ensemble de la classe vers l'objectif du chapitre : interpréter des phénomènes grâce au modèle de la réaction chimique. Ainsi, il ne se permet ce genre de questionnement qu'avec les élèves qui maîtrisent du modèle (Extrait 12).

87) Ens : ben fff en fait là j'le fais avec les groupes heu là typiquement je l'ai fait exprès j'l'ai fait avec le groupe le bon groupe entre guillemets  
88) Ch : d'accord  
89) Ens: parce que je sais que eux voilà heu ils peuvent déjà embrayer sur autre chose et que voilà ils peuvent avoir heu pousser un peu plus la réflexion  
90) Ch : mh  
91) Ens : heu j'l'ai pas fait avec le groupe en difficulté parce que je savais que là l'objectif c'était pas de parler de l'environnement

*Extrait 12: extrait de l'entretien post-observation de la séquence 3 « Des atomes et des molécules dans ma cuisine » avec Gauthier (phase 1) [08 : 19 à 08 : 37]*

Ces deux résultats de l'analyse du rapport au savoir « transformation chimique » de Gauthier montrent clairement une évolution des objectifs entre les séquences « Des atomes et des molécules dans ma cuisine » et « Des problèmes environnementaux ». En particulier, le statut accordé au savoir progresse entre ces deux séquences séparées dans le temps. La première est centrée sur l'appropriation du modèle de la réaction chimique, tandis que la seconde cherche à étudier des problèmes complexes à l'appui des savoirs enseignés précédemment — et supposés acquis par les élèves. Gauthier cherche déjà dans ses pratiques ordinaires à étudier un problème complexe à travers les savoirs de physique et de chimie.

La notion de configurations didactiques développée par Simonneaux (2011) nous permet de renforcer ce résultat.

#### 9.2.2.1.5 Discussion des configurations didactiques

L'extrait « cycle du carbone et étude de la complexité » semble concilier savoirs pluriels, stratégie didactique problématisante et posture épistémologique réaliste critique (Figure 97).

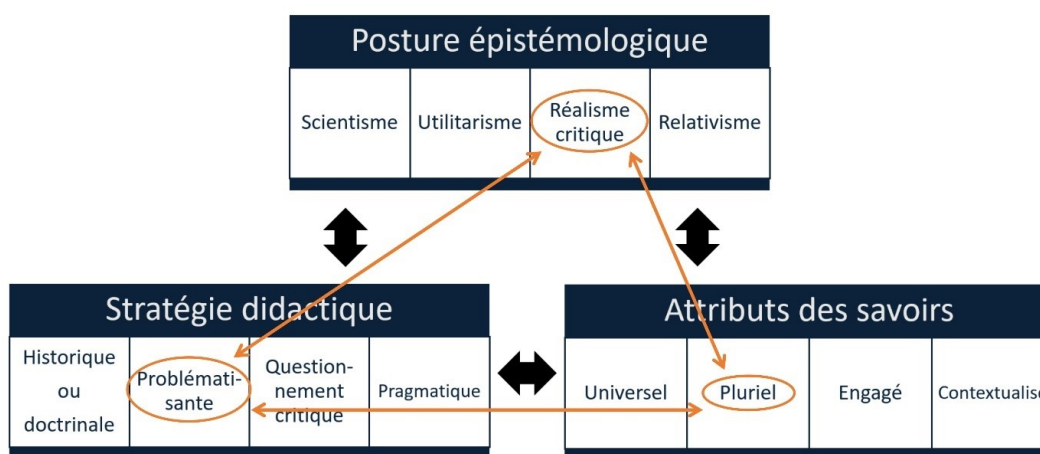


Figure 97 : configuration didactique reconstruite à partir de l'extrait « centrale thermique et réchauffement climatique »

En effet, dans cet extrait, Gauthier souhaite introduire l'étude du fonctionnement des centrales thermiques à travers un problème environnemental : leurs effets sur le climat. Plusieurs modèles sont alors convoqués dans le milieu dont les combustions, l'effet de serre. Si la tâche va consister à modéliser le fonctionnement des centrales thermiques comme une réaction de combustion, l'enjeu secondaire visé par cette activité concerne la compréhension de l'origine de l'accumulation de gaz à effet de serre dans l'atmosphère. Aussi, nous reconstruisons une configuration didactique problématisante, orientée vers l'élaboration du problème complexe lié à l'environnement mis à l'étude (Simonneaux, 2011, p. 149).

L'étude de l'extrait issu de la phase 2 d'observation montre un renforcement de l'étude de la complexité, notamment avec l'apport des perspectives biologique, géologique et technologique convoquées par le cycle du carbone.

#### 9.2.2.2 Extrait « cycle du carbone et étude de la complexité » : modélisation des flèches du cycle du carbone comme des réactions chimiques et lien avec l'effet de serre

##### 9.2.2.2.1 Présentation de l'extrait

L'extrait significatif que nous allons maintenant étudier est issu de la séance 2 de la séquence « L'impact de l'être humain sur le cycle du carbone » que Gauthier a conçue pour la phase 2 d'observations. En effet, nous rappelons que cet enseignant organise l'enseignement-apprentissage des transformations

chimiques selon deux séquences dont la première s'intitule « Cycle du carbone et empreinte carbone ». Cet extrait appartient à la phase de l'action N24c qui consiste en la mise en évidence de la production de dioxyde de carbone dans l'atmosphère par les activités anthropiques industrielles. Cette réflexion sur les conséquences des activités humaines sur le réchauffement climatique (enjeu N24) intervient après l'étude du fonctionnement des centrales à charbon, notamment grâce au modèle de la combustion du carbone (enjeu N23) (Figure 98). Nous avons repéré ce même enjeu dans la séquence ordinaire de Gauthier lors de notre analyse des observations de la phase 1 que nous venons d'exposer (cf. 9.2.2.1). En phase 2, le cycle du carbone sert de support pour mettre en relation le modèle de la réaction chimique (N24b) et celui de l'effet de serre (N24d).

Enjeux de niveau N	Enjeux/tâche de niveau N-1	Phases de l'action (étapes ou organisation pour atteindre l'enjeu)
Etude des centrales à charbon : réaction de combustion du carbone (équation de réaction), bilan énergétique, réflexion sur les effets des activités humaines sur le climat (effet de serre) <b>N2</b> [33min]	Présentation des objectifs <b>N21</b> [26 :40 à 27 :07 / TdP 38]	
	Etude de la combustion du charbon <b>N22</b> [27 :07 à 43 :20 / TdP 38 à 97]	Présentation des consignes <b>N22a</b> [27 :07 à 30 :53 / TdP 38 à 50]
		Travail des élèves en autonomie <b>N22b</b> [30 :53 à 40 :52 / TdP 50 à 73]
		Mise en commun : définition de la combustion <b>N22c</b> [40 :52 à 41 :45 / TdP 73 à 79]
		Identification des molécules mises en jeu <b>N22d</b> [41 :45 à 42 :56 / TdP 79 à 93]
		Ecriture de l'équation de réaction <b>N22e</b> [42 :56 à 43 :20 / TdP 93 à 97]
Etude des conversions d'énergie : dessin de la chaîne énergétique <b>N23</b> [43 :20 à 48 :44/ TdP 97 à 99]		
Réflexion sur les conséquences des activités humaines sur le climat <b>N24</b> [48 :44 à 59 :36 / TdP 99 à 170]	Explicitation des consignes <b>N24a</b> [48 :44 à 50 :34 / TdP 99 à 101]	
	Etude de la réaction de fabrication du ciment (pistes rouges – les autres éls travaillent en autonomie) <b>N24b</b> [50 :34 à 53 :55 / TdP 101 à 123]	
	Mise en commun : mise en évidence de la production de dioxyde de carbone par les activités humaines <b>N24c</b> [53 :55 à 58 :07 / TdP 123 à 163]	
	Explication du principe de l'effet de serre <b>N24d</b> [58 :07 à 59 :36/ TdP 163 à 170]	

Figure 98 : extrait du synopsis de la séance 2 — phase 2 — séquences « L'impact de l'être humain sur le cycle du carbone » chez Gauthier

Comme précédemment, l'extrait de synopsis de séance rapporté ci-dessus ne présente pas la colonne des événements significatifs. La ligne grisée correspond à un enjeu de la séance portant sur des savoirs de physique (énergie), que nous n'analysons pas dans le cadre du présent travail.

Dans l'extrait que nous avons choisi (Extrait 13), Gauthier cherche à faire émerger en collectif les réponses aux questions de l'activité sur lesquelles les élèves ont travaillé en autonomie pendant quelques minutes (N24b). Ces questions concernent les effets des activités anthropiques sur l'atmosphère et le réchauffement climatique. L'extrait intervient dans la seconde moitié de la séance 2, après des rappels sur la solubilité et le pH (enjeu N1).

123) Ens : alors si on réfléchit à la dernière partie tous ensemble il nous reste 5 minutes pour y réfléchir ouais;

124) El14 : pour répondre à la première question

125) Ens : alors je t'écoute heu alors attends bon alors vous avez tous pas tous exactement le même intitulé de question, mais grosso modo c'est la même chose; heu donc oui pour la première question quelles sont les activités humaines quelles activités humaines ont un effet sur l'atmosphère

126) El14 : l'agriculture l'industrie les transports et la déforestation

127) Ens : ok donc on a heu alors attends je vais les écrire dans le même ordre que les pistes vertes

128) El1 : mais les pistes vertes on n'a pas ça

129) Ens : non parce que du coup vous vous les aviez déjà écrites donc on a bon alors la première qu'on a étudiée je vais quand même la marquer on a les centrales; centrales à charbon; ensuite tu m'as dit tu m'as dit quoi;

130) El14 : agriculture

131) Ens : ok agriculture heu ouais ensuite

132) El14 : l'industrie

133) Ens : heu l'industrie ben du coup c'est les centrales

134) El14 : heu les transports

135) Ens : heu ouais ok t'as regardé par rapport au document qu'y avait; ou t'as fait c'que t'avais en tête

136) El14 : heu non j'ai regardé ici

137) Ens : ok parce que là / là ici on nous donne quoi d'autre; El14 : mais j'ai pas regardé ici moi

138) Ens : ok t'as regardé où; dans les documents;

139) El14 : j'ai regardé heu sur le document 4

140) Ens : ah ok d'accord ok bon on va y revenir après; là dans les documents qu'on vous donne on vous parle de quoi aussi; donc on dit les combustibles la combustion ça c'est quoi; (*pointe un document projeté au tableau*)

141) El1 : XX

142) Ens : non cimenterie donc c'est la production de ciment (*écrit au tableau de gauche*) / ok heu l'agriculture et donc si vous regardez c'qu'on vous dit ici on vous parle de quoi;

143) Els : décomposition des déchets

144) Ens : des de la décomposition des déchets d'accord donc quand on jette les poubelles et dernière chose qu'y avait / juste là hop (*affiche le document concerné*) / en violet / la déforestation; ouais (*écrit au tableau de gauche*) déforestation ok; et donc la question c'est de savoir pour chacun d'entre eux qu'est-ce que ça va produire comme gaz donc les centrales on a dit tout à l'heure que ça libérait quoi; du;

145) El 9 : co2

146) Ens : du dioxyde de carbone; alors pour aller plus vite je vais juste écrire les formules des composés je vais pas écrire dioxyde de carbone je vais écrire la formule de la molécule qui a dans ce dans ce gaz à effet de serre; donc co2 ok; heu les déchets on vous dit que ils libèrent quoi les déchets

147) El 20 : du méthane

148) Ens : du méthane, est-ce que vous vous rappelez heu la formule du méthane c'était dans votre évaluation / ouais,

149) El (*hors champ*) :  $\text{CH}_4$

150) Ens :  $\text{CH}_4$ , exactement donc (*écrit au tableau de gauche*)  $\text{CH}_4$ , pour le méthane ça c'est la molécule de méthane, «fin la formule le «fin la formule chimique de la molécule de méthane, pour la cimenterie on vient de voir que ça libérait du,

151) El? : ciment

152) El? :  $\text{CO}_2$

153) Ens : du dioxyde de carbone aussi du ciment, mais du dioxyde de carbone d'accord puisque c'est c'qu'on a fait avec les pistes rouges et la déforestation dans le graphique on vous dit que ça libère aussi du, (*pointe le document au tableau*)

154) El7 :  $\text{CO}_2$

155) Ens : du  $\text{CO}_2$  donc du dioxyde de carbone, or comme on l'a vu en évaluation tous ces gaz que ce soit le  $\text{CO}_2$  le dioxyde de carbone ou heu le méthane d'accord qu'on peut écrire avec dont on peut écrire la molécule avec cette formule là (*pointe la formule au tableau*) ce sont des gaz à effet de serre, ok, donc du coup / on peut marquer que ce sont des gaz (*écrit au tableau de gauche*) à / effet / de / serre, alors pour les pistes vertes je crois qu'il y avait juste à mettre des croix c'est ça, / oui, c'est ça non pour les pistes vertes il fallait mettre des croix,

156) El7 : de quoi mettre

157) Ens : vous aviez des croix à mettre

158) El5 : XX (*montre son cahier*)

159) Ens : ouais dans le tableau

160) El5 : oui oui

161) Ens : dans le tableau t'as écrit  $\text{CO}_2$  ou  $\text{CH}_4$  «fin là tu l'as pas écrit mais tu vas l'écrire et à côté tu mets des croix pour dire ou tu mets oui ou non pour si c'est heu heu gaz à effet de serre ou non bon là en l'occurrence ils sont tous des gaz à effet de serre, ok, c'est bon t'as pu noter,

*Extrait 13: « cycle du carbone et étude de la complexité » Gauthier — phase 2 — séquence « L'impact de l'être humain sur le cycle du carbone » — séance 2 [53 :55 à 58 :07]*

#### 9.2.2.2.2 Éléments de la relation contrat didactique-milieu

Au début de l'extrait « cycle du carbone et étude de la complexité », le milieu matériel est constitué du document de l'activité « 2.1 Émission de gaz à effet de serre » projeté au tableau, ainsi qu'à disposition de chaque élève, en fonction de leur niveau. En effet, Gauthier a conçu des documents différenciés afin de proposer des activités plus ou moins détaillées aux élèves : piste verte, piste bleue et piste rouge, qui reprennent les niveaux de difficultés et de technicités des pistes de ski (du moins difficile au plus difficile). Par exemple, les questions d'une activité « piste verte » présentent des sous-questions qui guident le raisonnement des élèves les plus en difficulté en physique-chimie (Figure 99).

## Activité 2.1 – Piste verte

Questions		
2- Etude de l'effet des activités humaines sur le climat (doc. 3, 4 et 5) :		
a- Complète le tableau suivant :		
Activités humaines	Gaz émis	Gaz à effet de serre (oui/non)
Centrales à charbon		
Déchets		
Cimenterie		
Déforestation		
b- Comment expliquer le réchauffement climatique ?		
Les rayons solaires entre dans _____ et sont _____ par le sol. Alors, la Terre se réchauffe et renvoie d'autres _____ qui ne peuvent pas sortir de l'atmosphère à cause des _____.		

## Activité 2.1 – Piste bleue

- 2- Etude de l'effet des activités humaines sur le climat (doc. 3, 4 et 5) :
- Quelles activités humaines ont un effet sur l'atmosphère ?
  - Que produisent ces activités humaines qui part dans l'atmosphère ?
  - Comment expliquer le réchauffement climatique ?

## Activité 2.1 – Piste rouge

- 3- Etude de l'effet des activités humaines sur le climat (doc. 3, 4 et 5) :
- Quelles sont les conséquences des activités humaines sur l'atmosphère ?
  - Comment expliquer le réchauffement climatique ?

Figure 99 : exemples de questions de l'activité « Émission de gaz à effet de serre » pour les pistes vertes, bleues et rouges

Le document projeté au tableau est celui de la piste bleue, mais Gauthier tient en main le document « piste verte » pour rédiger les réponses au tableau dans l'ordre correspondant aux textes précomplétés. Pour expliquer ces modalités d'organisation pédagogique, Gauthier est tout d'abord en posture de surplomb, puis il dévolue la responsabilité d'identifier les activités humaines ayant « un effet sur l'atmosphère » à E114 qui demande la parole. Pour répondre à cette première question, les élèves ont à disposition plusieurs documents, notamment le résumé du fonctionnement des centrales thermiques (Figure 100) et une modélisation de l'effet de serre (Figure 101).

### Doc. 1 : Emissions de gaz carbonique

Le dioxyde de carbone a toujours été présent dans l'atmosphère mais depuis un siècle, les activités industrielles en rejettent de grandes quantités dans l'atmosphère. En particulier, les centrales thermiques à charbon produisent de l'électricité grâce à la **combustion du charbon** qui rejette du dioxyde de carbone et de la vapeur d'eau. Par comparaison, une centrale hydraulique rejette 250 fois moins de dioxyde de carbone.

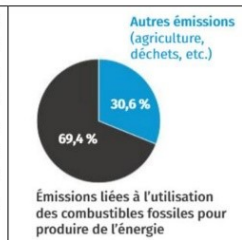


Figure 100 : résumé du fonctionnement des centrales thermiques extrait du document « piste bleue » de Gauthier

### Doc. 4 : L'effet de serre

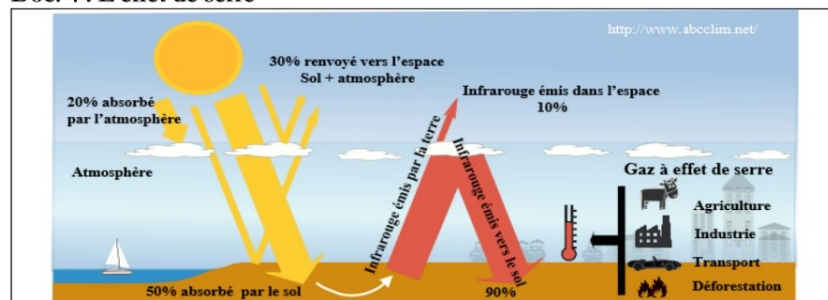


Figure 101 : modélisation de l'effet de serre extraite du document « piste bleue » de Gauthier

De plus, il est mentionné en accompagnement des questions sur le document des trois pistes que celles-ci font référence aux documents 3, 4 et 5 (cf. Figure 101). Aussi, E14 s'appuie visiblement sur le document 4 pour produire un trait pertinent qui fait avancer le temps didactique. Elle cite l'agriculture, l'industrie, les transports et la déforestation.

S'en suit un moment de ralentissement du temps didactique au cours duquel Gauthier cherche à aménager les réponses amenées dans le milieu par E14 et les différentes structures des documents de référence, en particulier pour s'approcher le plus possible de la structure du texte de réponse de la piste verte. L'enseignant est alors en posture d'accompagnement et demande plusieurs fois à E14 de reformuler ses propositions avant de les inscrire au tableau. Au cours de ces échanges, il se rend compte que les propositions de cette élève sont en décalage avec les éléments de réponses indiqués sur le document « piste verte ». Notamment, E14 évoque le rôle de « l'industrie », réponse que nous pouvons interpréter comme une formulation quotidienne, quand Gauthier attendait la mention des centrales à charbon — centrales thermiques — pour faire le lien avec la modélisation dans le registre de la chimie réalisée juste avant cet extrait. Quand E14 indique s'être appuyée sur le document 4 pour formuler sa réponse, Gauthier précise qu'il souhaite se concentrer sur le document 1 pour le moment. Avec cette régulation, il se place en posture de surplomb. Nous observons alors une rupture de contrat. En effet son discours entre en contradiction avec les indications disponibles sur le document de référence, indications qui ont probablement guidé E14 lors de l'étude des documents 3, 4 et 5 pendant le temps de travail en autonomie. Il nous semble que cette rupture est induite par les difficultés de gestion des dimensions pédagogiques de cette activité différenciée. En mettant en œuvre trois niveaux avec trois documents de référence différents pour une séquence qui n'avait jamais été mise en œuvre jusqu'alors, Gauthier a ajouté une contrainte pédagogique à la conception didactique.

Pour faire progresser l'avancée du savoir après ce moment d'incertitude, l'enseignant, toujours en posture de surplomb, rappelle aux élèves la responsabilité d'identifier les activités anthropiques ayant un effet sur l'atmosphère. Il accélère le temps didactique en citant les combustions évoquées dans le document 1. E11 produit un trait non pertinent, provoquant un léger ralentissement du temps didactique.

Gauthier se place alors en posture de surplomb pour identifier la cimenterie et l'agriculture puis il confie l'identification de la dernière cause d'émission de GES aux élèves en pointant le document de référence au tableau, ce qui leur permet de citer la décomposition des déchets, proposition qui fait avancer le temps didactique.

Gauthier institue cette proposition et poursuit en posture de surplomb pour identifier la déforestation dans le dernier document de l'activité. Il confie ensuite aux élèves la responsabilité d'identifier les différents gaz produits par l'ensemble de ces activités anthropiques. E19 se saisit de cette responsabilité en évoquant le « CO<sub>2</sub> ». Dans ce contexte, la formule se place dans le modèle macroscopique puisque E19 désigne à travers elle le gaz produit par les différentes transformations chimiques. En instituant ce trait pertinent, Gauthier explicite oralement la signification qu'il accorde aux formules reportées au tableau. Il indique en effet écrire la formule des molécules composant les GES. Avec cette définition, l'enseignant révèle la dualité macro-micro du langage de la chimie aux élèves et met explicitement en relation noms des espèces chimiques et modélisation au niveau microscopique du modèle. Pendant ce court moment, le temps didactique avance.

Cette accélération se poursuit avec l'entrée du méthane dans le milieu à travers une intervention d'E110. Gauthier institue ce trait pertinent et accompagne les élèves dans la modélisation microscopique de ce

gaz. Un élève propose la formule « CH<sub>4</sub> » que Gauthier institue au niveau du modèle microscopique comme « la formule chimique de la molécule de méthane », il accompagne ensuite les élèves vers l'identification du produit de la cimenterie. Un élève produit d'abord une réponse en rupture avec le contrat didactique : « du ciment ». Si cette réponse est juste du point de vue du procédé industriel, Gauthier attend une réponse mobilisant les concepts de la chimie, orientée vers l'étude des gaz à effet de serre. Cette première réponse induit alors un ralentissement du temps didactique. Un autre élève produit immédiatement après un trait pertinent en identifiant le « CO<sub>2</sub> ».

Gauthier adopte alors une posture de surplomb pour instituer cette dernière réponse et confier aux élèves la responsabilité d'identifier le GES produit par la déforestation. E17 occupe cette responsabilité. En citant le « CO<sub>2</sub> », il produit une accélération du temps didactique. Gauthier poursuit en posture de surplomb pour définir ces gaz comme étant « à effet de serre ». À travers cette définition, il met en relation le modèle de la réaction chimique mobilisé précédemment pour modéliser les activités industrielles (cimenterie, centrales à charbon, etc.), le cycle du carbone qui contextualise l'ensemble de ces transformations chimiques et l'effet de serre, modèle sous-entendu dans l'expression « gaz à effet de serre ».

Ce moment d'accélération dans la co-construction du problème environnemental est temporairement freiné par de nouvelles incertitudes quant aux dimensions pratiques de rédaction des traces pour les différents niveaux des élèves (pour les pistes vertes ici).

Une fois encore, Gauthier se place en posture de surplomb pour revenir à l'enjeu de l'activité : réfléchir aux effets des activités humaines sur le réchauffement climatique. Il se lance alors dans une explication de la modélisation de l'effet de serre, présentée sur le document 4 (Figure 101). Il est interrompu brièvement par une intervention non pertinente de E12 qui propose une explication relevant d'un modèle quotidien — conception du couvercle (Maron et al., 2022) —, mais régule cette proposition avant qu'elle n'ait le temps de ralentir le temps didactique, pour finalement terminer la séance en posture de surplomb sur le lien entre GES et augmentation de la température terrestre.

**Pour résumer, dans cet extrait, l'enjeu est de mettre en relation les modèles du cycle du carbone, de la réaction chimique et de l'effet de serre pour comprendre l'origine anthropique du réchauffement climatique. À cette fin, Gauthier s'appuie sur la mémoire didactique des élèves et les documents prévus pour la séance. Il demande dans un premier temps de rappeler les activités anthropiques ayant « un effet sur l'atmosphère », puis d'identifier le gaz produit par ces activités. Pour répondre à cette dernière question, les élèves doivent interpréter les phénomènes comme des réactions chimiques. Plusieurs élèves font avancer le temps didactique en rappelant les produits des réactions étudiées au cours des séances précédentes. Gauthier adopte une posture de surplomb pour interpréter ces gaz comme étant « à effet de serre ». Il introduit alors dans le milieu le modèle de l'effet de serre et conclut sur l'augmentation de la température terrestre.**

#### 9.2.2.2.3 *Interprétations*

L'étude de cet extrait à l'échelle micro révèle une évolution des objectifs d'enseignement-apprentissage associés aux problèmes environnementaux entre la séquence ordinaire de Gauthier et la séquence qui intègre le cycle du carbone. Au cours de l'extrait « cycle du carbone et étude de la complexité », le modèle de la réaction chimique permet d'interpréter les différentes activités anthropiques industrielles comme produisant du dioxyde de carbone. Gauthier demande aux élèves de mobiliser le principe de

conservation de la matière pour identifier les espèces chimiques consommées et produites par ces réactions chimiques, puis à l'aide du modèle de l'effet de serre, il met en évidence le lien entre production de dioxyde de carbone dans l'atmosphère et réchauffement climatique. Ce raisonnement complexe repose sur le modèle du cycle du carbone, qui fonctionne de façon implicite tout au long de l'extrait. En effet, les compartiments « lithosphère », « atmosphère », « hydrosphère » et « biosphère » qui ont été étudiés au cours de la séquence 1 « Cycle du carbone et empreinte carbone » ne sont pas reconvoqués dans le milieu. Cependant, l'étude du problème complexe relatif à l'anthropocène montre la remobilisation des concepts/modèles de la chimie élaborés au cours de la séquence 1.

*A contrario*, l'étude de l'extrait « centrale thermique et réchauffement climatique » (cf. 9.2.2.1) donne à voir une séance plutôt orientée par des enjeux d'enseignement-apprentissages spécifiques à la chimie, bien qu'elle démarre par une discussion à propos de la relation entre centrales thermiques et effet de serre.

L'analyse du rapport au savoir « cycle du carbone » de Gauthier apporte des éléments contribuant à caractériser l'évolution des objectifs de l'enseignant entre les deux phases d'observations.

#### 9.2.2.4 *Éléments du rapport au savoir de l'enseignant*

Au cours de l'entretien *post*-observations de la phase 2, Gauthier nous rapporte porter son attention sur la façon dont les élèves mettent en relation les différents modèles scientifiques pour interpréter les conséquences des activités anthropiques industrielles sur l'environnement (cycle du carbone, réaction chimique et effet de serre). Il précise ne pas être entièrement satisfait lorsque les élèves produisent des réponses dans le registre quotidien, par exemple « ça pollue ». Manifestement, l'intégration du cycle du carbone à la séquence a modifié les objectifs d'enseignement-apprentissage associés à la compréhension des problèmes environnementaux. Dans l'analyse de la séquence ordinaire de Gauthier, nous avons montré que celui-ci cherchait surtout à accompagner les élèves à identifier les problèmes, à être capables de présenter une situation problématique lors de l'évaluation et à mobiliser certains savoirs spécifiques pour l'interpréter (cf. 9.2.2.1). L'analyse des pratiques au cours de la phase 2 montre un déplacement des enjeux vers la modélisation de situations complexes qu'il évalue notamment à travers le langage employé par les élèves (Extrait 14).

8) Ens: voilà, après en ce qui concerne le la partie sur l'environnement qui était aussi un un volet important de ce chapitre-là c'était un des enjeux / je sais pas si c'est très bien passé hum / là encore ce matin quand je leur ai posé des questions sur le cycle sur heu cycle du carbone sur heu sur la pollution sur heu c'que faisaient les usines ça vient pas naturellement alors je sais pas s'ils étaient endormis particulièrement ce matin, mais ça vient pas et hum et bon à l'évaluation y'avait une question sur heu heu l'effet du dioxyde de carbone sur l'environnement la plupart m'ont dit effet de serre «fin ou un réchauffement climatique donc ça ça oui, mais par contre heu heu j'en ai beaucoup qui heu se limitent à ça pollue, et heu et du coup je sais pas si c'est vraiment bien passé ce message-là et je pense qu'il faudrait aller un peu plus en soit plus en profondeur

Plus tard, à propos de l'évaluation

258) Ens: mais en tout cas par contre les objectifs sur l'environnement heu ça a l'air d'être plutôt bon alors y'a pas 36000 questions hein mais heu mais ça a l'air d'être plutôt compris puisque ils m'ont tous dit heu «fin y'en a beaucoup qui m'ont dit heu heu alors moi j'attendais heu gaz à effet de serre ou heu réchauffement climatique, mais heu puisque c'est ce qu'on avait travaillé, mais y'en a beaucoup qui m'ont dit ça pollue c'est polluant heu ces des gaz qui polluent donc bon

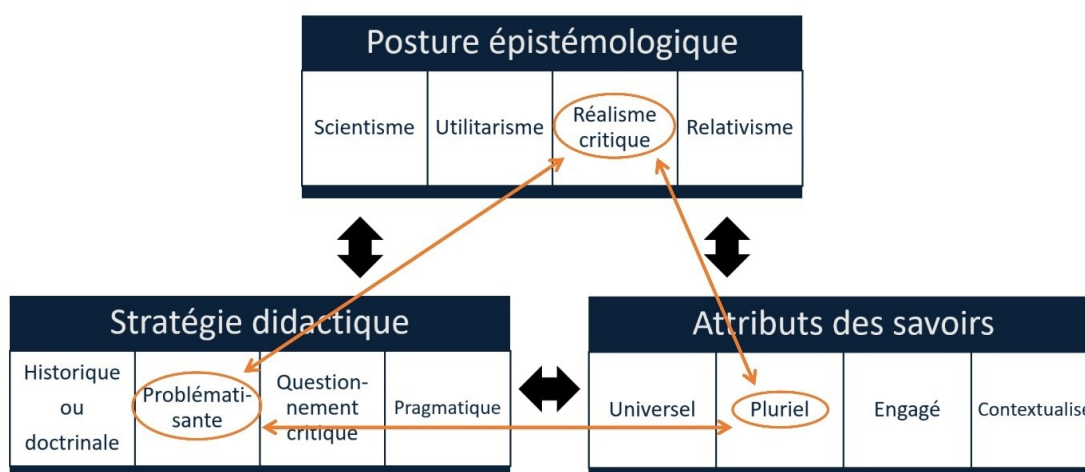
*Extrait 14: extrait de l'entretien post-observations avec Gauthier (phase 2) [01 : 39 à 02 : 33] et [36 : 51 à 37 : 12]*

Dans les activités proposées par Gauthier dans la séquence 1 « Cycle du carbone et empreinte carbone » et 2 « L'impact de l'être humain sur le cycle du carbone », de nombreux phénomènes biologiques, géologiques et technologiques qui interviennent dans le cadre du cycle du carbone sont présentés aux élèves. Il s'agit alors de les interpréter via le modèle de la réaction chimique. L'ensemble de ces modélisations permet d'identifier la production de gaz à effet de serre. Ainsi, leur mise en relation avec le modèle de l'effet de serre permet d'introduire le lien entre activités industrielles et réchauffement climatique.

La mise en relation de ces modèles au service de la compréhension de l'origine du réchauffement climatique devient l'objectif principal de Gauthier en phase 2. Paradoxalement, l'analyse microscopique de l'extrait « cycle du carbone et étude de la complexité » ci-dessus montre que cette mise en relation est plutôt à la main de l'enseignant qui occupe une posture de surplomb. Ces résultats sont corroborés par la construction de la configuration didactique relative à cet extrait.

#### 9.2.2.2.5 Discussion des configurations didactiques

L'extrait « cycle du carbone et étude de la complexité » semble concilier savoirs pluriels, stratégie didactique problématisante et posture épistémologique réaliste critique (Figure 102).



*Figure 102 : configuration didactique reconstruite à partir de l'extrait « cycle du carbone et étude de la complexité »*

En effet, l'enjeu de la séquence « L'impact de l'être humain sur le cycle du carbone » consiste non seulement à revoir les concepts de physique et de chimie enseignés depuis le début de l'année scolaire, mais aussi à les mobiliser pour comprendre un problème environnemental : l'origine anthropique du réchauffement climatique. Pour cela, Gauthier dévolue certaines responsabilités aux élèves à travers la

mise en œuvre d'un enseignement interactif. Les savoirs mobilisés sont pluriels, dans la mesure où ils convoquent différents modèles disciplinaires, sans être interdisciplinaires ou a-disciplinaires (Simonneaux, 2011, p. 91). Ceci correspond à la mise en œuvre d'une configuration didactique problématisante (Simonneaux, 2011, p. 149). Selon cet auteur cette configuration didactique vise à rendre les élèves responsables de leurs apprentissages, en favorisant notamment la recherche de sens dans les savoirs scientifiques. Simonneaux (2011) ajoute que dans une telle configuration « La construction du problème prime sur la recherche de solution » (p. 149). Nous rapprochons cette idée des éléments dégagés à partir de l'étude du rapport au savoir de Gauthier. En effet, la construction d'un problème est un objectif particulièrement prégnant au cours de la phase 1 d'observations, en particulier lors de la séquence « Des problèmes environnementaux » (cf. 9.2.2.1). Dans le chapitre suivant, nous cherchons à trouver des traces de la compréhension des élèves du problème complexe étudié dans ces extraits pour mesurer l'effet des pratiques observées sur les apprentissages (cf. Chapitre 10).

### 9.3 Conclusion du chapitre : le cycle du carbone au service de l'étude de la complexité

Dans ce chapitre, l'analyse à l'échelle macro des séquences d'une enseignante et de trois enseignants montre tout d'abord l'influence de notre greffe — le cycle du carbone — sur les précurseurs du fonctionnement du contrat didactique. En effet, nous observons chez chacun et chacune l'apparition d'enjeux relatifs à la compréhension de l'origine anthropique du réchauffement climatique dans la séquence élaborée en phase 2.

Dans un deuxième temps, l'analyse aux échelles méso et micro des cas de Nino et de Gauthier met en évidence l'évolution des enjeux d'enseignement-apprentissage vers l'étude d'un problème complexe en classe de chimie, soutenue par le cycle du carbone. La greffe semble avoir pris.

En effet, nous considérons certaines pratiques de Nino comme emblématiques de ce qu'il se passe également chez Aurélie et Henri. L'étude des pratiques de cet enseignant montre une évolution de la fonction du modèle de la réaction chimique : de l'interprétation de situations expérimentales (phase 1) à l'étude de l'origine anthropique du réchauffement climatique (phase 2). Si certains éléments du discours de Nino et de l'organisation de sa séquence peuvent faire penser que le cycle du carbone est considéré comme un exemple d'application du principe de conservation de la matière dans une séquence orientée vers l'appropriation du modèle de la réaction chimique par les élèves, les résultats des analyses micro montrent que la mise en relation du cycle du carbone et de la réaction chimique provoque une réflexion sur les conséquences des activités anthropiques industrielles sur l'environnement.

Le cas de Gauthier se distingue des autres, étant donné que sa séquence ordinaire prévoit déjà l'étude de problèmes environnementaux à la lumière de savoirs de physique et de chimie enseignés en classe de 4<sup>e</sup>. Nous observons cependant un renforcement de l'étude de la complexité avec l'introduction du cycle du carbone en phase 2. Ce dernier sert alors de fil conducteur pour les séquences 1 et 2. Les élèves ont l'occasion d'interpréter un ensemble de phénomènes biologiques, géologiques et technologiques à travers les modèles de la réaction chimique et de l'effet de serre. La mise en relation de différents modèles disciplinaires permet alors d'élaborer la dimension scientifique du réseau conceptuel permettant de comprendre le réchauffement climatique (cf. 4.3.4).

Les séquences de ces deux enseignants qui intègrent le cycle du carbone à l'enseignement-apprentissage des transformations chimiques semblent aller dans la direction d'une séquence codisciplinaire au service

de la compréhension de l'origine anthropique du réchauffement climatique. Nous relevons des traits communs de ces deux études de cas contrastées.

Premièrement, nous identifions une évolution du statut de l'objet « cycle du carbone » entre le moment de son introduction — début de la séance 3 chez Nino ; début de la séquence 1 chez Gauthier — et la fin de la séquence. Tout d'abord, chez ces deux enseignants, le cycle du carbone sert de contexte pour introduire les différentes transformations chimiques qui feront l'objet d'une modélisation en chimie. Chez Gauthier ce moment de contextualisation dure tout le temps de la séquence 1 « Cycle du carbone et empreinte carbone », qui est l'occasion de modéliser différents phénomènes biologiques (respirations, photosynthèse) et technologiques (moteurs à combustion et moteurs à hydrogène). Chez Nino, il concerne un moment plus court de la séance 3 (environ une heure) qui se focalise sur les réactions de combustions du charbon et du méthane, de photosynthèse et de respirations animale et végétale. Puis, le cycle du carbone devient le support de la réflexion sur le problème environnemental étudié. À partir de cette représentation, les deux enseignants convoquent les différents modèles disciplinaires nécessaires pour appréhender la complexité du problème mis à l'étude (effet de serre chez Gauthier, principe de conservation de la matière chez Nino). C'est pourquoi nous observons en phase 2 des allers-retours entre le modèle de la réaction chimique et le modèle du cycle du carbone sur le synopsis de séquence chez Gauthier (échelle macro) et le synopsis de séance chez Nino (échelle méso). Ce premier constat nous conduit à formuler les deux suivants.

Deuxièmement, il semblerait que les enjeux relatifs aux différents modèles disciplinaires ne soient pas menés de front par ces deux enseignants, mais qu'ils interviennent en alternance, se soutenant progressivement dans l'élaboration du problème environnemental mis à l'étude. Par exemple, chez Gauthier, le cycle du carbone introduit dans la séquence 1 « Cycle du carbone et empreinte carbone » soutient l'étude du réchauffement climatique au cours de la séquence 2 « L'impact de l'être humain sur le cycle du carbone ». À cette fin, le modèle de la réaction chimique est mobilisé pour interpréter les combustions mises en jeu dans les activités industrielles, puis mis en relation avec celui de l'effet de serre (Figure 103).

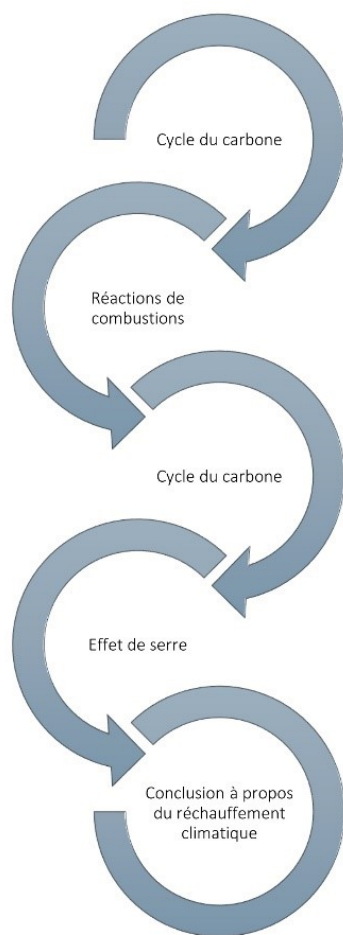


Figure 103 : illustration de l'articulation des modèles disciplinaires pour l'étude de la complexité chez Gauthier<sup>89</sup>

Troisièmement, bien que le cycle du carbone serve de contextualisation pour l'introduction du modèle de la réaction chimique et des concepts associés, ces derniers ont la priorité sur l'enseignement des autres modèles disciplinaires (cycle du carbone, photosynthèse, etc.) et sur l'étude du problème complexe.

Ce résultat est parfaitement aligné avec les prescriptions officielles de chimie des contextes français et suisse-romand du début du secondaire qui mettent particulièrement en avant l'enjeu de la modélisation (Sudriès et al., 2023). Aussi, ces savoirs disciplinaires semblent plus faciles à évaluer dans le cadre du cours de physique-chimie que la compréhension d'un problème complexe, interdisciplinaire par définition. Ce constat est d'autant plus prégnant en France, dans la mesure où les enseignements et les évaluations sont orientés vers la préparation du diplôme national du brevet<sup>90</sup> dès la classe de 4<sup>e</sup>.

De plus, dans l'analyse des cas de Nino et Gauthier, les savoirs spécifiques de la chimie semblent être des prérequis pour l'étude de la complexité, alors même que nous formulions l'hypothèse du potentiel apodictique du cycle du carbone lors de notre analyse a priori, c'est-à-dire son potentiel pour créer la nécessité du savoir « transformation chimique » (cf. 4.3.4). Pour expliquer ce constat, nous supposons que l'objectif de maîtrise du modèle de la réaction chimique à la fin du cycle 3/cycle 4 — enjeu principal

<sup>89</sup> Voir l'annexe 14 pour une version générique de ce schéma.

<sup>90</sup> Évaluation nationale qui vise à attester de l'acquisition des connaissances et compétences requises à la fin de la scolarité obligatoire (Ministère de l'Éducation nationale et de la jeunesse, 2024b).

des prescriptions officielles en Suisse romande et France — conduit les enseignants à mettre en œuvre un enseignement transmissif, sans se préoccuper d'aménager des situations créant la nécessité du savoir. En reprenant la métaphore de l'étoffe introduite par Morin (1982) pour parler de la complexité (cf. 1.2.1), nous serions tentées de dire que l'enseignement-apprentissage du modèle de la réaction chimique constitue l'étape préalable au « tissage » des fils de la complexité. Cette étape s'apparenterait alors au cardage de la laine afin de constituer les fils, puis à leur teinture dans les couleurs nécessaires pour composer le motif de l'étoffe.

Pour finir, l'analyse à l'échelle micro d'extraits significatifs de moments d'étude d'un problème environnemental chez Nino et Gauthier met en évidence une posture topogénétique plutôt haute chez ces deux enseignants. Nous relevons en particulier leur posture de surplomb et la prise de responsabilité de la mise en relation des différents modèles disciplinaires lorsqu'il s'agit de conclure sur les conséquences des activités industrielles anthropiques sur l'environnement (Nino) ou sur le réchauffement climatique (Gauthier). Nous formulons deux hypothèses pour expliquer ce constat.

La première hypothèse considère que le moment auquel nous faisons référence touche au nœud central de la complexité et demande une gestion magistrale de la codisciplinarité pour arriver à sa résolution. Ainsi, il est possible que gérer la dévolution dans ce moment particulièrement délicat ne soit pas chose aisée pour Nino et Gauthier en cette première expérience de mise en œuvre de la codisciplinarité. La bascule en posture topogénétique haute leur permet alors de contrôler les évolutions du milieu et garantit une avancée du temps didactique.

La seconde hypothèse prend en compte les contraintes pédagogiques communes à ces deux moments. Ils interviennent en effet à la fin d'une séance. Dans ces conditions, Nino et Gauthier ont possiblement adopté une posture surplombante pour s'assurer que les objectifs relatifs à la compréhension de l'anthropocène soient abordés dans le temps imparti. Peut-être au détriment de la co-construction du problème, c'est ce que nous allons explorer dans le chapitre suivant.

## CHAPITRE 10 — ÉTUDE À L'ÉCHELLE MICRO DE LA MISE EN ŒUVRE DE SÉQUENCES ARTICULANT CYCLE DU CARBONE ET MODÈLE DE LA RÉACTION CHIMIQUE

Dans ce chapitre, nous complétons les résultats présentés dans le chapitre 9 par des analyses d'extraits significatifs à l'échelle micro mis en perspective avec les entretiens menés avec les sujets avant et après les observations. Ces analyses sont outillées par le triplet de genèses emprunté au modèle de l'action didactique conjointe (Ligozat & Leutenegger, 2023; Schubauer-Leoni et al., 2007), l'étude d'éléments du rapport au savoir des enseignants et enseignantes (Charlot, 1997) et le cadre des configurations didactiques de Simonneaux (2011). Nous cherchons en particulier à répondre aux questions de recherches QR2 : « Comment l'enseignant ou l'enseignante de chimie utilise-t-il ou elle le cycle du carbone dans sa séquence sur la transformation chimique ? Quelle place est accordée dans le partage des responsabilités ? Quelles conséquences pour l'avancée de la chronogenèse ? », QR3 : « Quelles traces de l'appropriation du modèle de la réaction chimique sont visibles en situation dans le raisonnement des élèves à propos de l'origine anthropique du réchauffement climatique (problème complexe) ? » et QR4 : « En adoptant une approche codisciplinaire de l'enseignement de la transformation chimique, quelles traces de la compréhension de l'origine anthropique du réchauffement climatique peut-on trouver chez les élèves ? ». L'investigation de ces questions nous conduit à explorer les conditions de mise en œuvre de la codisciplinarité au service de l'étude d'un problème complexe en classe de chimie. Ainsi, nous aboutissons à une définition empirique de la codisciplinarité qui confirme la définition théorique que nous formulons au début de ce chapitre, sur la base d'une analyse a priori.

### 10.1 Construction d'indicateurs de codisciplinarité à l'échelle micro

L'analyse épistémologique de l'objet cycle du carbone (cf. 4.3.4) et les premiers résultats issus des études de cas de Nino et Gauthier présentés dans le chapitre 9 soutenus par le modèle de l'action didactique conjointe, nous permettent de construire des indicateurs au service de la définition de la codisciplinarité dans les situations d'étude d'un problème complexe relatif à l'environnement.

Nous formulons tout d'abord deux conditions préalables (CP) à l'utilisation de ces indicateurs : la situation doit proposer l'étude d'un problème complexe (CP1) et au moins deux matrices disciplinaires (au sens de Develay, 1992) doivent être convoquées (CP2). Les deux conditions préalables reposent sur le fait que le modèle de la codisciplinarité que nous développons cherche à répondre à un problème complexe. Selon la définition de Morin (1982), l'étude d'un tel problème est donc soumise à la présence d'au moins deux approches disciplinaires dans la situation.

Une fois ces deux conditions satisfaites, nous identifions cinq indicateurs pour mesurer la mise en œuvre de la codisciplinarité :

- I1 : le problème/la question/la tâche est explicitement défini(e) au cours de la situation. Cet indicateur complète la CP1. Nous considérons en effet que, si la présence d'un problème complexe est indispensable à la mise en œuvre de la codisciplinarité, cette dernière ne peut aboutir sans la définition explicite de ce problème dans le milieu. La définition du problème peut avoir lieu par l'introduction d'une question ou d'une tâche subsidiaire, à l'échelle d'une séance d'enseignement.

- I2 : les caractéristiques importantes des objets de savoirs disciplinaires<sup>91</sup> sont présentes dans le milieu. Cet indicateur concerne la structuration du milieu et l’accessibilité des différents savoirs disciplinaires nécessaires pour comprendre le problème complexe. I2 nous renseigne sur la présentation de modèles favorisant la structuration du milieu.
- I3 : certains objets de savoirs sont mis en tension dans le milieu<sup>92</sup>. À l’inverse de I2, l’indicateur I3 permet de saisir d’éventuels défauts de structuration du milieu.
- I4 : la situation/le phénomène étudié(e) est interprété(e) à l’aide de différents modèles disciplinaires.
- I5 : la mise en relation des modèles convoqués permet de répondre au problème soulevé initialement. Les indicateurs I4 et I5 fonctionnent ensemble et s’appuient sur la structuration du milieu décrite à travers I2 et I3. Lorsque les modèles nécessaires sont présents dans le milieu, ils peuvent être mis en relation et ainsi contribuer à la compréhension du problème complexe soulevé initialement.

Le premier indicateur (I1) repose sur l’hypothèse selon laquelle la codisciplinarité se développe au service des apprentissages si elle répond à un problème explicitement défini. De façon complémentaire, l’indicateur I5 mesure si la mise en œuvre de la codisciplinarité a permis la co-construction de ce problème par les sujets du système didactique. Cette mise en œuvre est décrite à travers l’étude du milieu (mésogénèse), en particulier les éléments favorisant (I2) ou défavorisant (I3) la modélisation de la situation dans le registre disciplinaire pertinent. Ces deux indicateurs à la formulation a priori contradictoire permettent en effet de décrire l’élaboration d’un milieu complexe propice à l’étude de l’anthropocène. Enfin, l’indicateur I4 se centre plus précisément sur l’articulation des différents modèles présents dans le milieu, dernière étape de mise en œuvre de la complexité. Ainsi, des éléments de mésogénèse, de topogénèse et de chronogénèse peuvent contribuer à la définition de I4.

Les indicateurs de codisciplinarité nous donnent alors des points de vigilance pour l’étude de l’élaboration de la relation contrat didactique-milieu dans les situations d’investigation de l’anthropocène en classe de chimie au secondaire I. Leur caractérisation repose sur une étude qualitative de ces situations.

## 10.2 Étude de la relation contrat didactique-milieu des extraits à potentiel codisciplinaire : vers un modèle de la codisciplinarité

### 10.2.1 Gauthier<sup>93</sup> : un exemple d’évolution vers la codisciplinarité

Nous avons montré dans le chapitre 9 que l’insertion du cycle du carbone dans les pratiques de Gauthier permet d’aller plus loin dans la modélisation d’un problème complexe : l’origine anthropique du réchauffement climatique. En phase 2, nous observons également chez Gauthier deux fonctions de l’objet « cycle du carbone » entre la séquence 1 « Cycle du carbone et empreinte carbone » et la séquence 2 « L’impact de l’être humain sur le cycle du carbone ». L’analyse d’un évènement significatif

---

<sup>91</sup> Dans le cas de l’étude de l’origine anthropique du réchauffement climatique à travers le cycle du carbone, nous serons attentive aux niveaux du modèle de savoir en chimie présents, aux registres de modélisation scientifique ou quotidien, à la dénomination des substances, à l’évocation des échelles de temps, etc.

<sup>92</sup> Dans le cas de l’étude de l’origine anthropique du réchauffement climatique, l’utilisation inattendue de modèles quotidiens, le passage implicite d’un modèle macroscopique à un modèle microscopique ou la mobilisation de savoirs inconnus pour les élèves peuvent freiner la mise en œuvre de la codisciplinarité.

<sup>93</sup> Les prénoms employés dans les chapitres de résultats sont fictifs.

de la séance 5 de la séquence 1 (Extrait 15) met en évidence le rôle de contextualisation qu'occupe le cycle du carbone dans cette première séquence.

### 10.2.1.1 Présentation de l'extrait « cycle du carbone et contextualisation »

Nous rappelons que Gauthier a organisé ses enseignements à propos des transformations chimiques et du cycle du carbone selon deux séquences consécutives : séquence 1 « Cycle du carbone et empreinte carbone » (Figure 104) et séquence 2 « L'impact de l'être humain sur le cycle du carbone » (Figure 105).

Enjeux de la séquence (N+1)	Enjeux N
Modélisation des transformations chimiques en jeu dans le cycle du carbone par la réaction chimique et étude des concepts associés (équation de réaction et principe de conservation)	Présentation du cycle du carbone : potentiel pour comprendre l'anthropocène <b>N1</b> <i>Séance 1 [2min]</i>
	Etude macroscopique de la réaction d'oxydation du mercure : introduction du principe de conservation, tests d'identification des gaz <b>N2</b> <i>Séance 1 [51min20] (x2)</i>
	Comparaison de l'effet sur l'environnement des voitures électriques et thermiques : modèle de la réaction chimique, concepts d'atome et de molécule et équation de réaction, principe de conservation <b>N3</b> <i>Séance 2 [46min20]</i>
	Rappels des notions introduites précédemment : composition de l'air, atome, molécule <b>N4</b> <i>Séance 4 [12min20]</i>
	Etude de la réaction de respiration animale : modélisation microscopique, équation de réaction, test d'identification du dioxyde de carbone <b>N5</b> <i>Séance 4 [37min45]</i>
	Retour au cycle du carbone : identification des molécules qui composent les substances mises en jeu <b>N6</b> <i>Séances 4 et 5 [10min30]</i>
	Rappel des concepts introduits précédemment : définition de la transformation chimique principe de conservation des atomes via une analogie (activité informatique), écriture de l'équation de réaction <b>N7</b> <i>Séance 5 [33min]</i>

Figure 104 : synopsis de la séquence 1 « Cycle du carbone et empreinte carbone » de Gauthier en phase 2

Enjeux de la séquence (N+1)	Enjeux N
Révision de concepts de physique et de chimie à travers l'étude de problèmes environnementaux présents dans le cycle du carbone	Etude de l'acidification des océans par dissolution du dioxyde de carbone gazeux : rappel de la définition de la transformation chimique, principe de conservation, mesure du pH <b>N1</b> <i>Séances 1 et 2 [1h10min]</i>
	Etude des centrales à charbon : réaction de combustion du carbone (équation de réaction), bilan énergétique, réflexion sur les effets des activités humaines sur le climat (effet de serre) <b>N2</b> <i>Séance 2 [33min]</i>
	Etude des quelques métaux lourds et conséquence sur l'environnement : masse volumique <b>N3</b> <i>Séance 3 [55min] (x2)</i>
	Etude des conséquences de la pollution de l'air : masse de l'air, masse volumique, réaction de formation de l'ozone <b>N4</b> <i>Séance 4 [55min]</i>

Figure 105 : synopsis de la séquence 2 « L'impact de l'être humain sur le cycle du carbone » de Gauthier en phase 2

Dans la séquence « Cycle du carbone et empreinte carbone », le cycle du carbone est introduit au début de la première séance (enjeu N1). Il est ensuite reconvoqué à l'issue de la séance 4 afin de mettre en relation les réactions chimiques qui ont été modélisées au niveau microscopique au cours de la séance et les différentes flèches du cycle du carbone (enjeu N6). Cet enjeu amorcé à la fin de la séance 4 (phase de l'action N61) est reporté à la séance 5 (phase de l'action N62) (Figure 106).

Enjeux de niveau N	Enjeux/tâche de niveau N-1	Phases de l'action (étapes ou organisation pour atteindre l'enjeu)
Retour au cycle du carbone : identification des molécules qui composent les substances mises en jeu <b>N6</b> <i>[8min15]</i>	Suite de l'identification des molécules qui composent les substances mises en jeu <b>N62</b> [14 :44 à 21 :36/ TdP 11 à 43]	Rappel et suite du bilan commencé la veille <b>N62a</b> [14 :44 à 16 :49 / TdP 11 à 15]
		Identification des molécules en jeu dans la réaction de photosynthèse <b>N62b</b> [16 :49 à 18 :31 / TdP 15 à 27]
		Identification des molécules en jeu dans la dissolution du dioxyde de carbone dans les océans <b>N62c</b> [18 :31 à 19 :35/ TdP 27 à 33]
		Identification des molécules qui composent le charbon <b>N62d</b> [19 :35 à 20 :29/ TdP 33 à 41]
		Identification des molécules qui composent les gaz produits par le volcanisme <b>N62e</b> [20 :29 à 21 :36 / TdP 41 à 43]
		Identification des molécules produites par la décomposition des matières organiques <b>N62f</b> [21 :36 à 21 :59 / TdP 43]
	Conclusion sur la conservation de l'élément carbone dans le cycle <b>N63</b> [21 :36 à 22 :58 / TdP 43]	Conclusion sur la conservation de l'élément carbone dans le cycle <b>N63a</b> [21 :36 à 22 :58 / TdP 43]

Figure 106 : extrait du synopsis de la séance 5 — séquence 1 « Cycle du carbone et empreinte carbone » chez Gauthier (phase 2)

Sur l'extrait de synopsis de séance ci-dessus, nous ne faisons pas figurer la colonne correspondant aux micro-événements liés aux objets afin de ne pas alourdir la lecture.

L'extrait sur lequel portent nos analyses intervient dans la première partie de la séance 5, au niveau des enjeux N62 et N63, entre les minutes 14 : 44 et 22 : 58 (Extrait 15).

- 15) Ens: heu donc du coup là hum typiquement qu'est-ce qu'on a vu dans l'activité précédente alors si je regarde heu hop si je regarde avec vous (*cherche le document à projeter au tableau*) donc celle-là par exemple / donc on avait travaillé sur le glucose le gaz carbonique le dioxygène le méthane et le calcaire d'accord; et juste en dessous je vous disais dans les documents les différents processus qui se produisaient d'accord alors la photosynthèse elle capte quoi; les arbres ils captent quoi ils captent du y'a marqué quoi; dioxyde de carbone et qu'est-ce qu'ils vont libérer;
- 16) E13 : heu du co2
- 17) Ens : ah non s'ils captent du dioxyde de carbone ils vont pas libérer du co2;
- 18) E13 : de l'oxygène
- 19) Ens : ouais ils vont libérer de l'oxygène; ok; donc du coup ça veut dire que dans mon cycle je peux dire que les arbres ils vont capter du co2 d'accord (*écrit les formules des molécules sur le cycle*) ils vont effectivement libérer du dioxygène; et ils vont aussi le co2 il leur sert à quoi;
- 20) E12 : respirer
- 21) Ens : alors il capte ouais il capte on va dire que c'est la respiration si tu veux des arbres c'est la photosynthèse et en fait ça leur permet de faire quoi;
- 22) E12 : se développer;
- 23) Ens : se développer d'accord et du coup ça développe la matière heu la matière organique c'est à dire la matière des heu êtres vivants; d'accord; la matière des êtres vivants on a vu que c'était par exemple hein les sucres; d'accord; les sucres on avait quelle formule est-ce que vous vous en rappelez est-ce que vous pouvez me redire c'qu'on avait noté; / ouais
- 24) E12 : c6h12o2;
- 25) Ens : (*écrit en même temps au tableau*) c6h12o O quoi; c'était pas o6;
- 26) E12 : heu ah si o6
- 27) Ens : o6 ok; donc du coup ça veut dire que finalement le dioxyde de carbone hein heu ici on retrouve une partie si vous voulez du dioxyde de carbone hein les mêmes atomes que le dioxyde de carbone; ici on a du H en plus d'accord qui s'est heu qui a été heu utilisé via c'qu'y avait dans les arbres évidemment puisqu'on peut pas fabriquer un atome; hein vous savez / heu ensuite si je regarde par exemple hum cette flèche ici (*pointe la flèche qui va de l'atmosphère à l'hydrosphère*) d'accord; là; ces flèches donc le dioxyde de carbone / si vous regardez hop juste là le dioxyde de carbone il va se dissoudre dans les lacs les océans et les mers d'accord et ça va devenir quoi; du; ouais;
- 28) E12 : calcaire
- 29) Ens : du calcaire; effectivement; du coup la formule du calcaire on l'avait aussi notée donc est-ce que vous pouvez me le donner; la formule du calcaire; / ouais E15
- 30) E15 : (*remarque HS*) c o minuscule
- 31) Ens : ouais Ca c'est Ca minuscule;
- 32) E15 : Ca minuscule co3

33) Ens :  $\text{CaCO}_3$ , parfait, effectivement donc là du coup le calcaire le calcaire pardon le dioxyde de carbone quand il est dissout ça va permettre de former du calcaire, tout à fait donc ensuite le charbon il est composé de quoi, / alors ça on avait pas noté, mais est-ce que vous savez de quoi est fait les mines de charbon par exemple, de quoi sont faites les mines de charbon

34) El2 : non

35) Ens : non, ben c'est du carbone, d'accord donc du coup là on a du carbone (*écrit sur la cycle du carbone*)

36) El2 : combien,

37) Ens : C, c'est tout en fait C si vous voulez le charbon c'est majoritairement fait de d'atomes de carbone les uns après les autres, d'accord,

38) El2 : les vélos qui sont en carbone

39) Ens : ouais

40) El2 : ils sont faits en charbon,

41) Ens : alors en fait si tu veux suivant comment sont hum organisés comment est organisé la matière on peut avoir différentes structures par exemple le diamant c'est aussi du carbone d'accord sauf qu'il est organisé différent différemment que heu le charbon, et du coup heu c'est pas du tout le même d'accord la même chose,

41) Ens : heu ok le gaz on vous parlait de différents gaz il me semble dans l'activité et on vous disait que hum alors est-ce que je vais y arriver / hum tac tac ouais (*affiche l'activité concernée*) on vous disait qu'y avait différents gaz qui étaient produits dans le volcanisme / qu'est-ce qui est indiqué là, (*pointe l'activité*) qu'est-ce que ça libère, y'a que El2 qui sait lire, ouais, vas-y

42) El2 : dioxyde de carbone et méthane

43) Ens: ok dioxyde de carbone et méthane effectivement, donc en fait déjà ici nous avons du gaz méthane qui va être produit donc le gaz méthane il est essentiellement composé de la molécule de méthane, et du coup la molécule de méthane sa formule c'est  $\text{CH}_4$ , ok,

43) Ens : c'est ce qu'on avait noté et ici du coup quand on a une éruption on a du  $\text{CO}_2$ , heu ouais ici, on a comment je vais le noter ici du  $\text{CO}_2$  (*écrit sur le cycle du carbone*) et du méthane  $\text{CH}_4$ , d'accord, / et est-ce qu'y avait autre chose que je voulais noter là-dessus, tac tac tac je crois que c'est à peu près bon / heu alors non une dernière chose quand la matière meurt et que du coup forcément alors je vous l'ai noté juste là / hop et que ça se décompose, d'accord, ici, (*pointe le texte projeté au tableau*) ben du coup les animaux quand ils se décomposent ils libèrent aussi des gaz du dioxyde de carbone, mais aussi du méthane, d'accord, donc ici on peut aussi y'a du carbone dans quasi la totalité des éléments bon là on a parlé du dioxygène, y'a pas de carbone, mais pour tous les autres vous avez le carbone qui intervient d'accord donc en fait si vous voulez c'qu'il se passe c'est qu'il y a des transformations chimiques d'accord hum dans la matière qui vont permettre de «fin qui vont permettre qui vont en fait engendrer la formation de molécules, d'accord à base de carbone et donc vous voyez que le l'atome de carbone il est passé d'une molécule à l'autre et ça fait un cycle, d'accord, c'est à dire qu'ici ensuite hop ça se ça ça

43) Ens : comment on appelle ça ça fermente hop et ça va dans le dans les sols ensuite ici on a les gaz etc dans la matière vivante la même chose ensuite dans la dissolution des gaz et vous trouvez que y'a le carbone partout, noter  $CH_4$  et là c'que vous constatez normalement si ça fonctionne bien c'est que pourquoi on appelle ça le cycle du carbone ouais;

44)E12 : y'a du carbone partout

*Extrait 15: « cycle du carbone et contextualisation » chez Gauthier (phase 2 — séquence « Cycle du carbone et empreinte carbone » — séance 5) [14 : 44 à 22 : 58]*

### *10.2.1.2 Éléments de la relation contrat didactique-milieu*

*Les analyses suivent la même organisation que celles présentées dans le chapitre 9 : nous présentons tout d'abord l'analyse complète de la relation contrat didactique-milieu outillée par le triplet de genèses, puis nous proposons un paragraphe de résumé de ces analyses, en gras dans le texte. Le résumé fait fonction d'étape pour guider le lecteur ou la lectrice qui souhaiterait poursuivre vers les interprétations sans s'engager dans la lecture des analyses extensives. Les analyses des trois autres études de cas présentées dans le présent chapitre suivent la même organisation.*

#### *10.2.1.3 Analyses détaillées*

Au début de l'extrait, le milieu est composé d'un objet symbolique : le cycle du carbone holocène projeté au tableau. Il s'agit d'une version « quantifiée » de la représentation que nous avons proposée à Gauthier. En effet, cet enseignant nous a demandé de modifier la largeur des flèches en fonction des quantités de substances carbonées échangées entre les différents compartiments afin d'introduire la notion de quantités de dioxyde de carbone émises/consommées dans l'atmosphère. À sa demande, nous avons également figuré un coquillage dans le compartiment hydrosphère afin de représenter la réaction du dioxyde de carbone dissout dans les océans avec le carbonate de calcium des coquilles (Figure 107), transformation qui est modélisée lors de l'activité 1.3 « Où va le carbone dans le cycle du carbone ? ».

## Le cycle du carbone

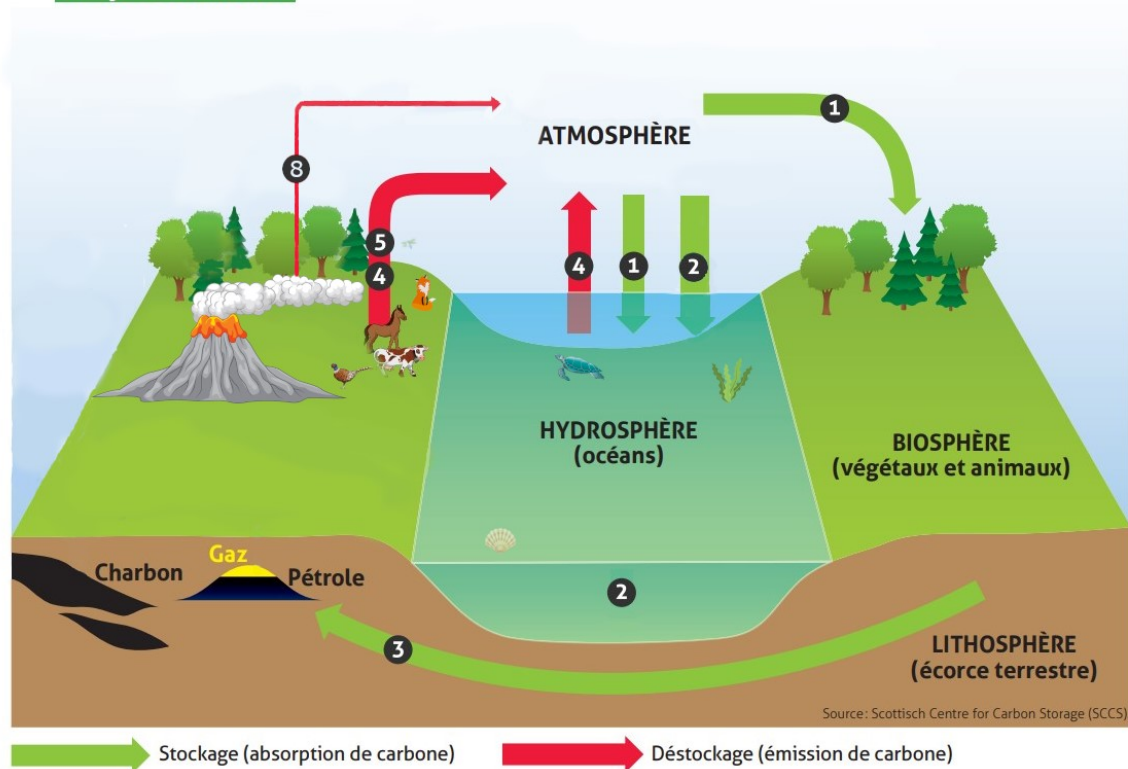





Figure 107 : représentation du cycle du carbone holocène quantifié

Le milieu est également composé du document de l'activité 1.3 et des éventuelles notes que les élèves ont rédigées pour répondre aux questions lors de la séance précédente. Gauthier, en posture de surplomb, commence par définir l'enjeu de ce premier moment de la séance, à savoir modéliser les flèches du cycle du carbone comme des réactions chimiques en leur associant les espèces chimiques consommées et produites. Le niveau microscopique du modèle est immédiatement et explicitement convoqué par la mention des « molécules qui interviennent dans le cycle du carbone ». Conservant sa posture de surplomb, l'enseignant poursuit ce moment de définition en projetant au tableau le document de l'activité 1.3 piste rouge<sup>94</sup> afin de rappeler les différentes transformations chimiques modélisées au cours de la séance précédente. Celles-ci sont notamment décrites dans le document 2 de l'activité (Figure 108).

<sup>94</sup> Gauthier conçoit des activités différenciées en reprenant le code couleur des pistes de ski pour signifier le niveau de difficulté croissante : piste verte, piste bleue, piste rouge (cf. 9.2.2).

**Doc. 1 : Noms et formules de quelques molécules du cycle**

Nom de la matière	Molécule majoritaire	Description des atomes contenus dans la molécule	Formule de la molécule	Schéma de la molécule
Eau	Eau	Atomes d'hydrogène : 2 Atomes d'oxygène : 1	H <sub>2</sub> O	
Sucre, glucose	Glucose	Atomes d'hydrogène : 12 Atomes de carbone : 6 Atomes d'oxygène : 6		
Gaz carbonique, dioxyde de carbone	Dioxyde de carbone	Atomes de carbone : 1 Atomes d'oxygène : 2	CO <sub>2</sub>	
Oxygène, dioxygène	Dioxygène	Atomes d'oxygène : 2		
Méthane	Méthane	Atomes d'hydrogène : 4 Atomes de carbone : 1	CH <sub>4</sub>	
Calcaire	Carbonate de calcium	Atomes de calcium : 1 Atomes de carbone : 1 Atomes d'oxygène : 3		

**Doc. 2 : Les transformations du cycle du carbone**

Parmi les processus biochimiques (liés aux êtres vivants) très rapides, il y a :

- La photosynthèse : les végétaux captent le dioxyde de carbone et utilisent l'énergie solaire pour le transformer en sucre qui servira à la fabrication des tissus végétaux.
- La consommation : les animaux herbivores, mangeant des végétaux, sont eux-mêmes mangés par les animaux carnivores. Les atomes de carbone sont donc transférés d'un échelon à l'autre de la chaîne alimentaire.
- La respiration : les êtres vivants respirent du dioxygène présent dans l'air. Le dioxygène se combine à un hydrate de carbone pour libérer du dioxyde de carbone.
- La décomposition et la fermentation : le carbone qui n'est pas relâché par la respiration s'élimine dans les déchets végétaux et animaux (urine, selle, organisme mort, etc.). Ces déchets sont, en autres, composés de dioxyde de carbone et de méthane.

Parmi les processus géochimiques (liés à la matière non vivante) très lents, il y a :

- La dissolution : Le dioxyde de carbone est dissous dans les océans et réagit avec l'eau pour devenir du calcaire. Ce composé va servir à la fabrication des coquilles et des squelettes des organismes marins.
- La sédimentation et la fossilisation : Les coquilles et les squelettes des organismes marins morts s'accumulent au fond de l'océan. Le calcaire s'accumule donc dans les sédiments et donne naissance à des roches composées d'atomes de carbone.
- Le volcanisme : au contact du magma, les roches sont brûlées et transformées. Ces processus libèrent du dioxyde de carbone et du méthane dans l'atmosphère.

Figure 108 : extrait du document de l'activité 1.3 « Où va le carbone dans le cycle du carbone ? » (piste rouge) de Gauthier

Aussi, Gauthier confie aux élèves la responsabilité d'identifier l'espèce chimique produite par la photosynthèse. L'explication du phénomène de photosynthèse présente sur le document relève plutôt du registre de la biologie (niveau macroscopique) et ne fait pas mention de la production de dioxygène. E13 se saisit de cette responsabilité, mais apporte un trait non pertinent dans le milieu en citant le CO<sub>2</sub>, ce qui ralentit l'avancée du savoir. Cet élève s'est certainement appuyé sur le document, sans faire appel à ses connaissances de biologie. L'enseignant se place alors en posture d'accompagnement en reprenant oralement l'information pertinente du document 2 : « les végétaux captent du dioxyde de carbone ». Cette intervention permet à E13 de produire un trait pertinent pour l'avancée du temps didactique en identifiant l'oxygène comme produit de la photosynthèse. Toutefois, cette réponse ne mobilise pas directement le concept de molécule, le nom de l'espèce chimique et de la molécule étant « dioxygène ». Gauthier passe alors en posture de surplomb pour instituer ce trait pertinent et le formuler dans le registre de la chimie. Il utilise les formules chimiques pour inscrire sur le cycle du carbone les espèces chimiques

consommées et produites par la photosynthèse. Les éléments du discours qui accompagnent ce geste « les arbres ils vont capter du CO<sub>2</sub> d'accord ils vont effectivement libérer du dioxygène » nous laissent penser que la modélisation se fait ici au niveau macroscopique, mais la dualité du langage de la chimie ne nous permet pas de l'affirmer avec certitude, contrairement au début de la séance où Gauthier annonçait explicitement s'intéresser aux molécules mises en jeu dans le cycle du carbone. L'enseignant bascule ensuite dans le registre de la biologie pour confier aux élèves la responsabilité de rappeler le rôle de la photosynthèse — information présente sur le document. E12 occupe cette responsabilité en évoquant la respiration, trait non pertinent du point de vue de la biologie qui ralentit la progression du temps didactique. Pourtant, Gauthier se place transitoirement en posture de surplomb et institue cette réponse pour accélérer le temps didactique en utilisant une analogie avec la respiration animale. Puis, en posture d'accompagnement, il réoriente les élèves vers l'identification de la fonction de la photosynthèse pour les végétaux. E12 produit alors un trait pertinent qui accélère le temps didactique : « se développer ». Gauthier adopte de nouveau une posture haute pour instituer ce trait pertinent et modéliser le phénomène biologique dans le registre de la chimie. À cette fin, il définit la matière organique comme étant du sucre et confie aux élèves la responsabilité d'identifier la formule chimique de l'espèce chimique. E12 saisit à nouveau cette responsabilité et fait avancer le temps didactique en citant la formule chimique attendue. Ici encore la dualité macro-micro du langage ne nous permet pas de dire avec certitude à quel niveau est modélisée la situation. Quelques indices dans le discours de Gauthier (« les sucres on avait quelle formule ») nous font pencher vers une modélisation macroscopique du phénomène biologique, quand son discours passe soudain au niveau microscopique pour mettre en évidence la conservation des atomes au cours de la réaction de photosynthèse. En posture de surplomb, l'enseignant institue la modélisation microscopique de la photosynthèse.

Le cycle du carbone étant projeté au tableau, il oriente les élèves vers l'étude de la flèche représentant la dissolution du dioxyde de carbone dans les océans. Il confie alors la responsabilité d'identifier la substance produite par cette transformation aux élèves. E12 occupe cette responsabilité et produit un trait pertinent dans le registre de la biologie qui fait avancer le temps didactique : « le calcaire ». L'enseignant occupe alors une posture d'accompagnement pour guider les élèves vers la modélisation du phénomène biologique dans le registre de la chimie en évoquant la formule chimique de l'espèce chimique (niveau macroscopique). E15 occupe cette responsabilité en citant la formule chimique du carbonate de calcium, provoquant une avancée du temps didactique. Gauthier adopte alors une posture topogénétique haute pour instituer la réponse d'E15 et reporter la formule chimique dans le compartiment hydrosphère du cycle du carbone.

Sans transition, il désigne le charbon symbolisé sur le cycle en confiant aux élèves la responsabilité d'identifier les molécules qui le composent. Ce partage des responsabilités produit en fait une rupture du contrat didactique, car aucun document de l'activité ne rend compte de la composition du charbon. L'enseignant tente d'apporter dans le milieu des éléments qui permettraient aux élèves de modéliser la composition de cette espèce chimique en évoquant les « mines de charbon ». Mais cette référence repose sur une culture chimique que les élèves de début de 4<sup>e</sup> n'ont pas et Gauthier, face à ce ralentissement du temps didactique, est contraint à introduire lui-même les atomes de carbone dans le milieu. Il se place alors au niveau de la modélisation microscopique. E12 ralentit temporairement l'avancée du savoir en interrogeant l'enseignant sur la composition des vélos en carbone. Cette intervention demande à Gauthier de basculer en posture de surplomb pour réguler l'incertitude en apportant des éléments hors programme sur la structure des différentes molécules composées de carbone.

Il accélère ensuite le temps didactique en projetant de nouveau le document de l'activité 1.3 et en confiant aux élèves la responsabilité d'identifier les produits du volcanisme. Le discours se situe alors dans le registre de la biologie, au niveau macroscopique. E12 occupe cette responsabilité et produit un trait pertinent en citant les gaz dioxyde de carbone et méthane (niveau macroscopique), provoquant une avancée du temps didactique. Gauthier, en posture de surplomb, institue la proposition d'E12 et prend en charge la modélisation microscopique du phénomène de volcanisme afin de rapporter les formules des molécules composant les espèces chimiques citées par E12 sur le cycle du carbone transitoirement projeté au tableau.

Il enchaîne immédiatement sur la modélisation microscopique de la décomposition des êtres vivants pour terminer d'écrire les formules des molécules impliquées dans les différentes réactions chimiques représentées sur le cycle du carbone. À la suite de ce long moment de surplomb, il dévolue aux élèves la responsabilité d'identifier la conservation de l'élément carbone à travers les compartiments du cycle. E12 occupe cette responsabilité. En remarquant que le carbone est partout, il accélère le temps didactique. Gauthier occupe une dernière fois une posture de surplomb pour instituer ce trait pertinent et conclure à propos de la conservation de l'atome de carbone à l'échelle du cycle.

Pour cela, il met explicitement en relation modèle macroscopique et modèle microscopique dans son discours afin de modéliser les phénomènes biologiques et géologiques comme des réactions chimiques qui s'enchaînent. Dans ce raisonnement final, les transformations des substances carbonées contenues dans les compartiments sont modélisées au niveau microscopique de sorte que Gauthier puisse interpréter le cycle par le principe de conservation de l'atome de carbone à travers les différentes molécules qui composent ces espèces chimiques.

#### *10.2.1.4 Résumé*

**Dans l'extrait « cycle du carbone et contextualisation » que nous venons d'analyser, nous repérons un motif d'étude des transformations chimiques impliquées dans le cycle du carbone qui se répète. Premièrement, Gauthier désigne la flèche qui va être interprétée et confie aux élèves la responsabilité d'indiquer les substances impliquées dans le phénomène (niveau macroscopique). À ce moment de l'étude, le domaine de la biologie est majoritaire et les élèves peuvent s'appuyer sur les documents de l'activité pour réactiver leurs connaissances. L'enseignant guide les élèves vers la modélisation du phénomène comme une réaction chimique au niveau microscopique du modèle de la chimie en leur demandant de citer les formules des molécules composant les espèces chimiques concernées. L'enjeu final consiste à associer à chaque flèche du cycle une équation de réaction chimique. En effet, l'équation de réaction apparaît dans cet extrait comme le support du raisonnement pour interpréter le cycle comme conservant l'atome de carbone. Gauthier procède selon le motif que nous venons de décrire pour l'étude des phénomènes de photosynthèse, de dissolution du dioxyde de carbone dans l'eau, de combustion du charbon, de volcanisme et de décomposition des substances carbonées.**

**Dans l'ensemble de cet extrait, nous repérons peu de moments de dévolution. L'activité fonctionne sur le mode « cours dialogué » (au sens de Hersant, 2004). Les responsabilités confiées aux élèves relèvent surtout de repérage d'informations dans les documents de l'activité. Le niveau conceptuel augmente à la toute fin de l'extrait tandis que Gauthier dévolue aux élèves la responsabilité d'appliquer le principe de conservation des atomes à l'ensemble du cycle du carbone.**

### 10.2.1.5 Interprétations

Pour identifier les activités humaines qui ont un effet sur le réchauffement climatique, il faut interpréter les flèches du cycle du carbone correspondant comme des réactions chimiques et identifier les produits de ces réactions. Les activités des sociétés industrialisées (au sens de Lévi-Strauss, 2011) peuvent être modélisées comme des combustions de matières fossiles carbonées (hydrocarbures, charbon) qui produisent le dioxyde de carbone, gaz à effet de serre. Pour comprendre l'accumulation du dioxyde de carbone dans l'atmosphère, il faut mettre en perspective d'une part les temps de réaction différents entre la formation des hydrocarbures et leur combustion, d'autre part les quantités de substances en jeu. En effet, l'augmentation de l'effet de serre est due à une augmentation de la quantité de dioxyde de carbone produit dans l'atmosphère, notamment par la combustion des hydrocarbures dans un temps trop court pour que les quantités d'hydrocarbures puisées ne puissent être reconstituées et dans des quantités trop importantes pour que la photosynthèse ne puisse compenser. Ce raisonnement repose sur le principe de conservation de l'élément carbone au sein du cycle, apporté par le modèle de la réaction chimique. Il met en évidence que c'est la forme « dioxyde de carbone » sous laquelle le carbone est stocké dans l'atmosphère qui pose un problème du point de vue environnemental. En relation avec le modèle du cycle du carbone interprété par la réaction chimique, le modèle de l'effet de serre permet de faire le lien entre activités des sociétés industrielles et réchauffement climatique.

L'analyse de l'extrait « cycle du carbone et contextualisation » à l'aide du triplet de genèses montre que l'objectif d'enseignement-apprentissage est orienté dans cette première séquence vers la modélisation d'un ensemble de phénomènes biologiques et géologiques comme des réactions chimiques. Cet extrait intervient à la fin de la séquence « Cycle du carbone et empreinte carbone » (séance 5), et le cycle du carbone occupe alors la fonction de contextualisation de l'ensemble des transformations chimiques étudiées.

Les concepts de molécules et d'atomes ainsi que les symboles et les formules chimiques introduites au cours de la séance 2 (enjeu N3) sont réinvestis dans le présent extrait au service de la modélisation dans le registre de la chimie de phénomènes qui ont pu être étudiés par ailleurs en classe de SVT et qui sont rappelés dans le document 2 de l'activité 1.3 (Figure 108). De ce point de vue, l'indicateur de codisciplinarité I2, relatif à la présence dans le milieu des caractéristiques importantes des objets de savoir, est présent. De même que les conditions préalables CP1 — traitement d'un problème complexe — et CP2 — présence d'au moins deux matrices disciplinaires — sont satisfaites.

La fonction du cycle du carbone évolue dans la séquence 2 « L'impact de l'être humain sur le cycle du carbone », comme l'a montré notre analyse de l'extrait « cycle du carbone et étude de la complexité » développé dans le chapitre 9 (cf. 9.2.2). En effet, au cours de l'activité 2.1 « Émission de gaz à effet de serre », l'enjeu est de modéliser des transformations chimiques relevant des activités des sociétés industrialisées (centrales à charbon, combustion des déchets, cimenterie et déforestation), puis d'identifier les gaz à effet de serre (GES) produits par ces transformations chimiques. La réflexion sur les conséquences environnementales de telles activités convoque ensuite l'étude du modèle de l'effet de serre. Ainsi, la conclusion de l'activité 2.1 porte sur l'origine anthropique du réchauffement climatique (enjeu N24).

Cependant, on observe dans l'analyse de l'extrait « cycle du carbone et étude de la complexité » un effacement du modèle du cycle du carbone. Celui-ci n'est pas explicitement mobilisé pour raisonner sur les quantités de GES émises dans l'atmosphère et celles consommées par l'hydrosphère et la biosphère,

comme cela a pu être le cas au cours de la séquence 1 lorsqu'il est question des réactions chimiques « naturelles » (extrait « cycle du carbone et contextualisation »). Dans l'extrait « cycle du carbone et étude de la complexité », le raisonnement se focalise sur la flèche rouge qui relie la partie industrialisée de la biosphère à l'atmosphère (cf. 9.2.2.2), tout en faisant fonctionner le modèle du cycle du carbone de façon implicite. Tout se passe comme si ce dernier, minutieusement étudié à travers le modèle de la réaction chimique au cours de la séquence 1, faisant désormais partie intégrante du milieu, sans qu'un retour à sa représentation ne soit indispensable.

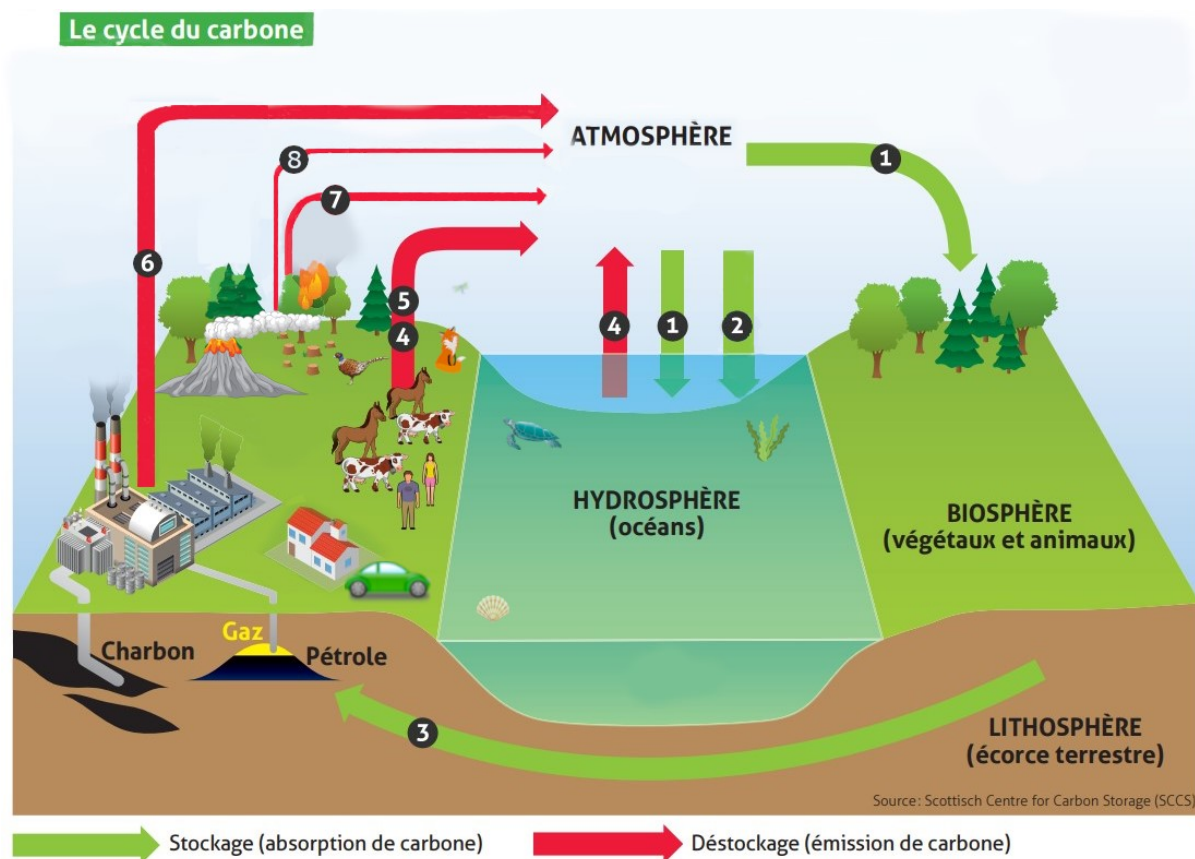


Figure 109: représentation du cycle du carbone anthropocène quantifié proposée à Gauthier (non présentée aux élèves)

Toutefois, les moments correspondant à l'étude de la complexité dans les extraits concernés sont majoritairement pris en charge par l'enseignant qui se place en posture de surplomb, que ce soit pour mettre en relation les modèles biologique/géologique et chimique dans la séquence « Cycle du carbone et empreinte carbone » (extrait « cycle du carbone et étude de la complexité ») ou pour mettre en évidence le rôle des activités anthropiques industrielles dans l'augmentation de l'effet de serre dans la séquence « L'impact de l'être humain sur le cycle du carbone » (extrait « cycle du carbone et contextualisation »).

Ces résultats sont renforcés par l'étude d'éléments du rapport au savoir « transformation chimique » de l'enseignant.

#### 10.2.1.6 Étude du rapport au savoir de l'enseignant

L'étude du rapport au savoir « transformation chimique » qui fait l'objet d'un paragraphe dans le chapitre 9 (cf. 9.2.1.2.4) met en évidence deux fonctions associées au concept : premièrement son

interprétation à l'aide du modèle de la réaction chimique, deuxièmement, son réinvestissement au service de l'étude d'un problème complexe — l'origine anthropique du réchauffement climatique.

Ainsi, en phase 2, le cycle du carbone intervient au service de ces deux fonctions. Tout d'abord pour contextualiser l'étude de différentes réactions chimiques, puis comme support du raisonnement à propos du réchauffement climatique.

L'étude du triplet, mésogénèse, topogénèse, chronogénèse, complétée par l'analyse a priori du savoir dont il est question, nous donne des indices à propos des attributs du savoir enseigné, de la stratégie adoptée par l'enseignant et de l'épistémologie qui en découle. La mise en perspective de ces dimensions nous permet de discuter nos analyses à la lumière de la notion de configurations didactiques de Simonneaux (2011).

### 10.2.1.7 Discussion des configurations didactiques

Dans l'extrait «cycle du carbone et contextualisation» que nous venons d'analyser, la posture épistémologique est plutôt scientifique. À l'échelle de cet extrait, l'enjeu est orienté vers la modélisation des phénomènes biologiques et géologiques dans le registre de la chimie à travers le modèle de la réaction chimique. Aussi, les savoirs sont pluriels et la stratégie didactique reste problématisante (Figure 110).

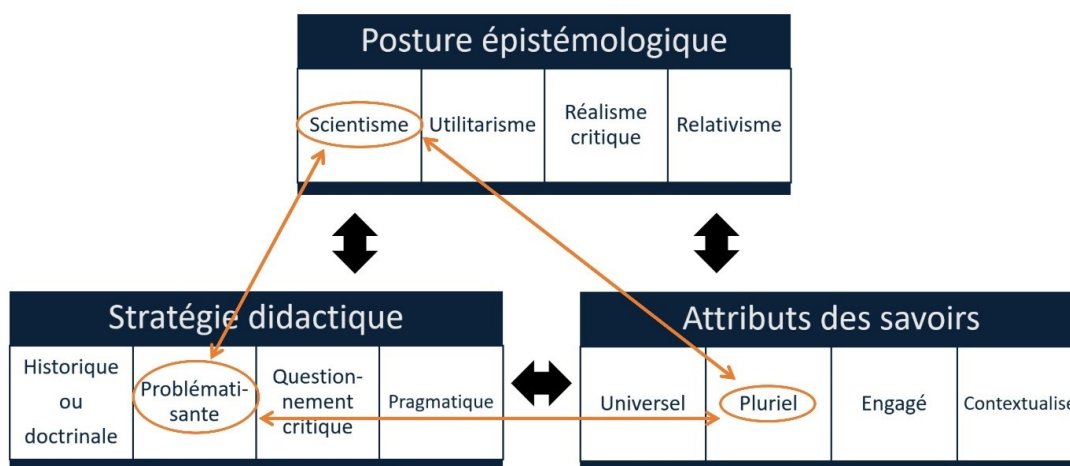


Figure 110 : configuration didactique reconstruite à partir de l'extrait « cycle du carbone et contextualisation »

La configuration didactique que nous venons de décrire correspond à la «configuration problématisante» (Simonneaux, 2011, p. 149). Selon cet auteur, une alternance entre les postures épistémologiques réaliste critique et scientifique peut être observée dans l'accompagnement des élèves dans la construction d'un problème. Aussi, nous reconstruisons également une configuration didactique problématisante à partir l'extrait «cycle du carbone et étude de la complexité» (cf. 9.2.2.2), mais Gauthier adopte cette fois-ci une posture épistémologique réaliste critique. Il semblerait que la configuration problématisante, centrée sur la construction d'un problème par les élèves (Simonneaux, 2011, p. 149) soit majoritairement privilégiée par cet enseignant pour étudier le réchauffement climatique à partir du cycle du carbone.

#### *10.2.1.8 Schéma de la codisciplinarité chez Gauthier*

L'analyse micro des extraits significatifs de l'action de Gauthier en situation, mis en perspective avec l'étude méso des synopsis de séances des séquences 1 et 2 que cet enseignant a conçues en phase 2 nous permet d'élaborer le schéma de mise en œuvre de la codisciplinarité suivant (Figure 111).

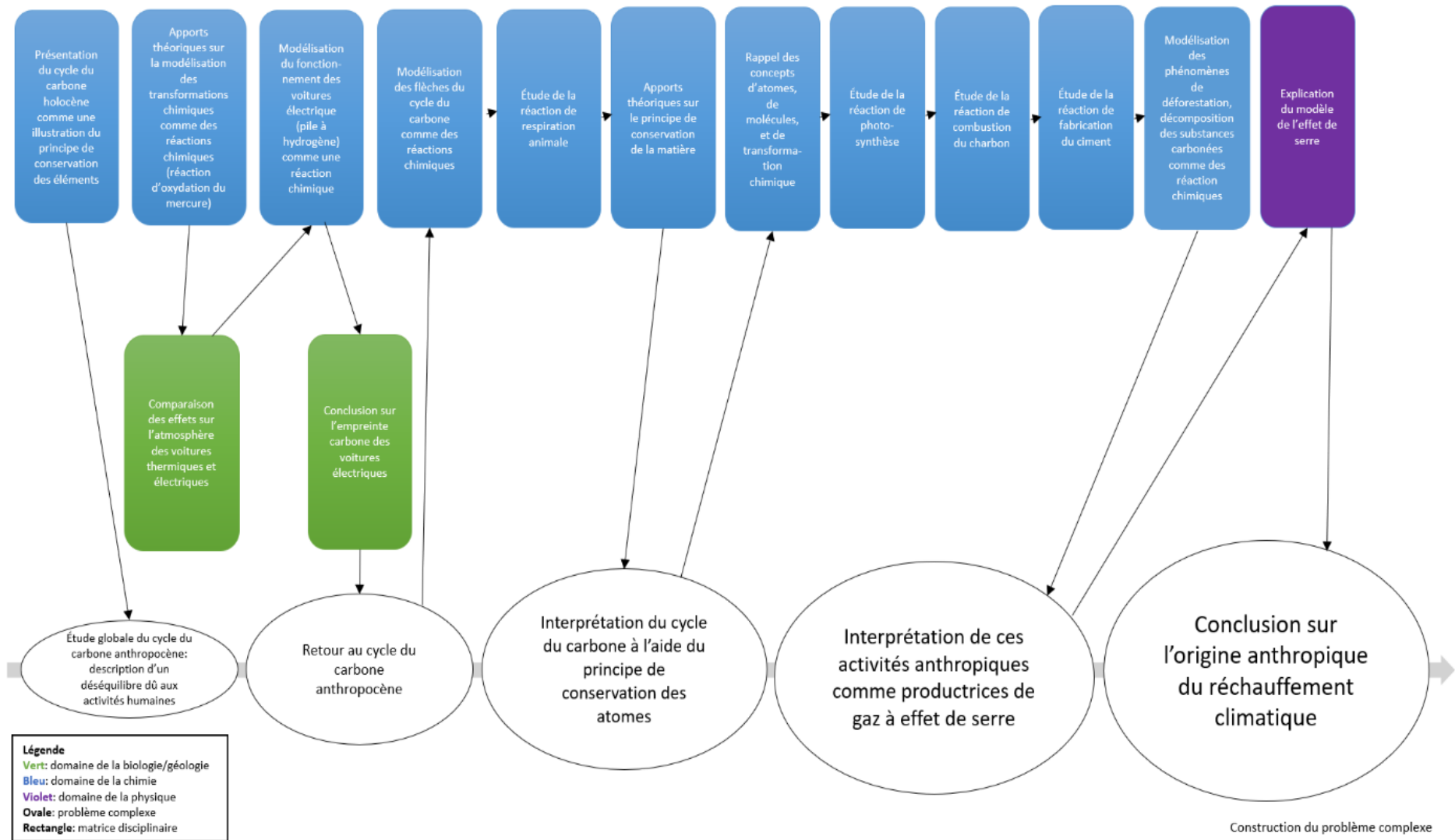


Figure 111 : schéma de la mise en œuvre de la codisciplinarité chez Gauthier (phase 2)

Ce schéma met en évidence les deux fonctions du cycle du carbone élaborées par Gauthier en phase 2 dont nous venons de discuter. Au cours de la séance 1 de la séquence 1 (Figure 104), le cycle du carbone est présenté comme élément de contexte pour introduire le principe de conservation des éléments. Si la question du déséquilibre du cycle du carbone d'origine anthropique est esquissée ici, comme amorce du problème complexe, elle n'est pas directement mise en relation avec les savoirs spécifiques de la chimie qui font l'objet de cette première séquence. C'est la réflexion sur l'impact des véhicules thermiques et électriques sur l'environnement qui permet une progression dans l'élaboration du problème complexe. Celle-ci est permise par la mise en relation des modèles chimique et biologique/géologique (indicateur de codisciplinarité I5). On observe un retour au cycle du carbone au cours des séances 4 et 5 de la même séquence (extrait « cycle du carbone et contextualisation ») qui permet une interprétation du cycle en termes de conservation de l'élément carbone. Le schéma montre également que la codisciplinarité se développe au cours de la séance 2 de la séquence 2 (Figure 105) à travers la mise en relation de différents modèles disciplinaires qui permettent l'étude de la complexité (réaction chimique et effet de serre), sans retour au schéma cycle du carbone. Néanmoins, nous remarquons une élaboration progressive du problème complexe en cinq étapes, alimentée par les différents modèles disciplinaires. En reprenant les indicateurs de codisciplinarité définis au début de ce chapitre (cf. 10.1), nous pouvons dire que les conditions préalables sont satisfaites : trois matrices disciplinaires sont présentes dans les séquences de Gauthier (biologie/géologie, chimie et physique) et un problème complexe émerge dès la séance 1 de la séquence 1 (I1). Il apparaît également que la conclusion de la séquence 2 revient sur le problème amorcé en introduction (I5) à travers la mise en relation des différents modèles disciplinaires (I4) (Figure 112).

CP1: Traitement d'un problème complexe	CP2: Au moins deux matrices disciplinaires sont présentes	I1: Identifier le problème/la question/la tâche	I2: Les caractéristiques importantes des objets de savoir sont présentes dans le milieu	I3: Certains objets de savoir sont mis en tension dans le milieu	I4: Le phénomène est interprété à l'aide de différents modèles disciplinaires	I5: La mise en relation des modèles permet de répondre à la question/au problème initial
oui	oui	problème introduit avec la présentation du cycle du carbone (séance 1 séquence 1)	oui	non	cycle du carbone, réaction chimique, effet de serre	mise en évidence de l'origine anthropique du réchauffement climatique (séance 2 séquence 2)

Figure 112 : tableau récapitulatif des critères de codisciplinarité reconstruits à travers les séquences de Gauthier (phase 2)

Nous pouvons rapprocher le schéma de la codisciplinarité que nous avons élaboré ci-dessus (Figure 111), de la dimension scientifique du réseau conceptuel que nous avons élaborée dans le chapitre 4 en appui sur une analyse épistémologique des savoirs nécessaires pour comprendre le réchauffement climatique (Figure 113).

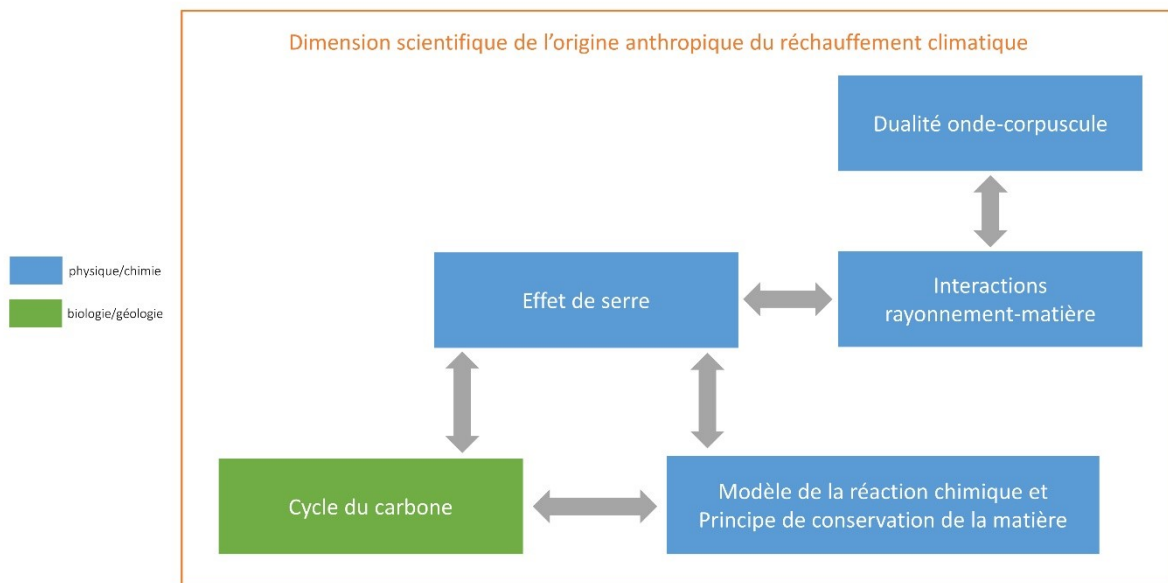


Figure 113 : relation entre les concepts scientifiques contribuant à comprendre l'origine anthropique du réchauffement climatique

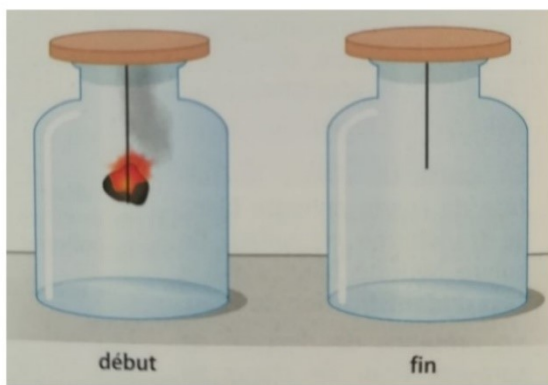
Retrouver un tel réseau conceptuel dans l'analyse de la séquence de Gauthier nous permet d'identifier son haut potentiel codisciplinaire — c'est-à-dire son potentiel pour étudier un problème complexe. Pourtant, les entretiens post-observations menés avec les élèves n'apportent pas d'indices concluants quant à leur compréhension des conséquences des activités humaines industrielles sur le réchauffement climatique.

### 10.2.1.9 Du côté des élèves

#### 10.2.1.9.1 Déroulé des entretiens post-observations en phase 2

Les entretiens post-observations menés avec les élèves à la fin de la phase 2 d'observations sont structurés de la façon suivante : après quelques questions à propos de ce que l'élève se souvient spontanément de la séquence sur le principe d'un « bilan de savoirs » au sens de Charlot (1999), nous lui présentons trois illustrations de situations (la combustion du charbon, la fusion de la glace et un cycle du carbone) et l'invitons à les commenter l'une après l'autre. En utilisant ces illustrations, nous cherchons à reconvoquer les savoirs abordés au cours de la séquence : la transformation chimique, définie en relation avec la transformation physique et le problème complexe en lien avec l'anthropocène mis à l'étude. La représentation du cycle du carbone que nous choisissons est inconnue des élèves (Figure 114). Toutefois, nous avons également à disposition une impression du cycle du carbone utilisé par l'enseignant ou l'enseignante pour anticiper le cas où l'élève ne parviendrait pas à reconnaître le cycle du carbone qui lui est présenté (cf. annexe 15 pour consulter le guide d'entretiens complet). L'enjeu consiste notamment à demander aux élèves de faire du lien entre la situation 1 (la combustion du charbon) et la situation 3 (le cycle du carbone) afin de saisir le niveau de codisciplinarité de leurs discours selon les indices de mise en relation des modèles disciplinaires (indicateurs de codisciplinarité I4 et I5).

Situation 1 :



Situation 2 :



Situation 3 :

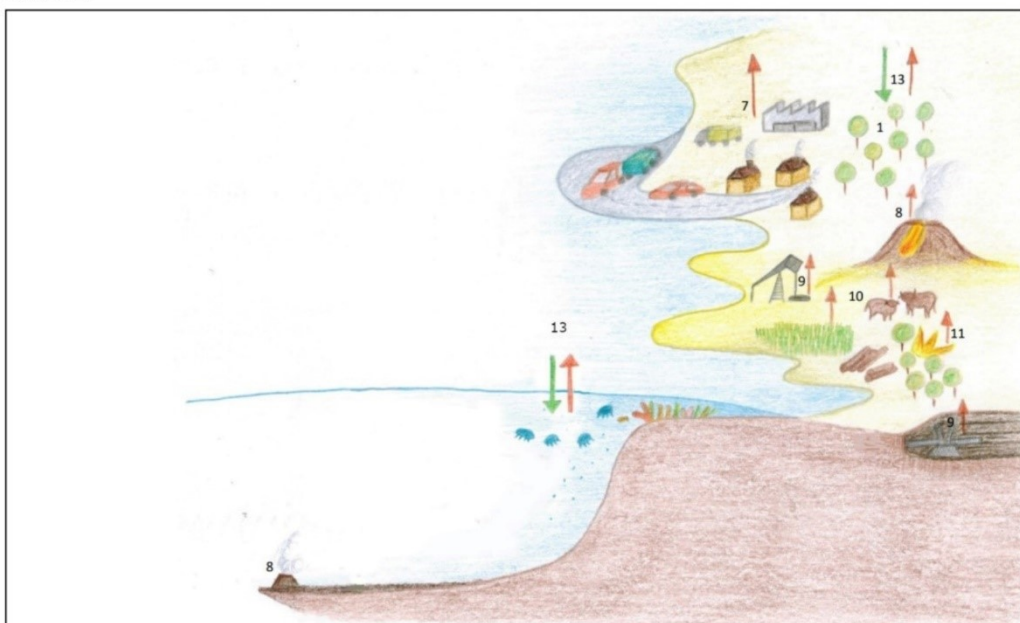


Figure 114 : illustrations utilisées en entretiens post-observations avec les élèves en phase 2

#### 10.2.1.9.2 Quelles traces de la compréhension de l'anthropocène dans le discours des élèves de Gauthier ?

Les entretiens auprès de deux élèves de la classe de Gauthier montrent des résultats nuancés. L'enseignant les décrit comme « une élève moyenne » (E11) et « un bon élève » (E12) du point de vue de leurs apprentissages en physique-chimie. Du côté des résultats, si le bon élève parvient à nous expliquer la relation entre augmentation des activités humaines industrielles et augmentation de dioxyde de carbone dans l'atmosphère, il ne semble pas avoir compris le rôle de ce gaz à effet de serre dans l'augmentation des températures terrestres et le relie plutôt au trou dans la couche d'ozone (Extrait 16).

129) Ch : mh mh et du coup ce type de schéma ça permet de heu de voir quoi↑  
 130) El2 : de se rendre heu compte que heu si on compare les deux que quand y'a les humains il «fin y'en a beaucoup plus beaucoup plus de carbone  
 131) Ch : et c'est quoi le souci du du carbone notamment là dans l'atmosphère  
 132) El2 : heu ça fait un trou dans la couche d'ozone, mais après j'en sais pas

*Extrait 16: entretien post-observations avec El2 — Classe de Gauthier (phase 2) [07 : 47 à 08 : 09]*

Le trou dans la couche d'ozone est un concept qui n'est pas abordé dans le cadre de la séquence de Gauthier et qui provient des connaissances personnelles que l'élève a pu élaborer à partir d'autres enseignements ou de ses expériences personnelles. La réponse de cet élève va dans le sens des résultats des études sur les conceptions à propos de l'effet de serre (Jakobsson et al., 2009; Roßbegalle & Ralle, 2016). Ces études montrent en effet que les élèves associent souvent la production de gaz à effets de serre et la formation du trou dans la couche d'ozone.

Si Gauthier présente le modèle de l'effet de serre à la fin de la séquence, il est probable que la posture topogénétique haute et le peu de dévolution observées au cours de cet épisode ne permettent pas aux élèves d'être partie prenante de l'élaboration de ce savoir (Extrait 15).

Aussi, l'entretien post-observations avec l'élève moyenne montre sa grande confusion vis-à-vis de l'interprétation du cycle du carbone. Sur la représentation du cycle du carbone inconnu, elle commence par interpréter les flèches rouges comme « la chaleur qui monte » et les flèches vertes comme « le froid qui descend ». Pour l'accompagner dans l'identification des transformations de substances carbonées, nous lui présentons alors les cycles du carbone holocène et anthropocène utilisé par Gauthier dans la séquence, mais la confusion persiste, comme l'illustre son discours dans l'extrait suivant (Extrait 17).

121) Ch : bon ça c'est dessiné donc c'était peut-être moins évident / est-ce que du coup là heu les flèches rouges et les flèches vertes tu sais t'arrives mieux à me dire à quoi ça correspond  
 122) El1 : heu là du coup c'est heu ha du hum / je sais plus ce que c'est du co2 un truc comme ça  
 123) Ch : mmh  
 124) El1 : et heu après c'est du / là je crois c'est du o2  
 125) Ch : ouais /  
 126) El1 : après je sais plus non là h2o, et là je crois c'est o2

*Extrait 17: entretien post-observations avec El1 — classe de Gauthier (phase 2) [06 : 39 à 07 : 09]*

Puis elle évoque de nouveau les échanges de chaleur entre les compartiments, interprétant les flèches comme ce qui est « réchauffé » ou « refroidi ». De toute évidence, cette élève ne parvient pas à mobiliser le modèle de la réaction chimique pour interpréter les phénomènes représentés sur le cycle du carbone, malgré notre invitation à mettre en relation la combustion du charbon, qu'elle a modélisée comme une transformation chimique au début de l'entretien, et les flèches du cycle. Si le modèle de la réaction chimique semble maîtrisé, il ne permet pas à cette élève d'expliquer un problème complexe qui sort du cadre balisé de la matrice disciplinaire « chimie ». Ces résultats mis en perspective avec la posture de surplomb de Gauthier à la fin de l'extrait « cycle du carbone et étude de la complexité » (cf. 9.2.2.2) nous amènent à nous interroger sur un effet potentiellement différenciateur de ce type de mise en œuvre

de la codisciplinarité au service de l'étude de problèmes environnementaux — ou, *a minima*, que cette mise en œuvre ne permet pas de combler certains écarts d'apprentissages déjà présents. Selon cette hypothèse, les élèves dont les connaissances personnelles permettent d'entrer dans la compréhension du problème auraient un avantage vis-à-vis de celles et ceux qui ne peuvent construire leur étude du problème qu'à partir du milieu développé dans la situation, en particulier lorsque ce milieu ne comporte pas d'éléments suffisants du point de vue des modèles mis en jeu ou de l'élaboration du problème complexe. Toutefois, le cas de E12 montre aussi que l'évocation du réchauffement climatique en classe de science convoque un ensemble de modèles liés aux problèmes environnementaux, mais pas toujours pertinents pour expliquer l'origine de l'augmentation des températures terrestres — le trou dans la couche d'ozone en est un exemple.

Enfin, les entretiens post-observations menés avec trois élèves à l'issue de la phase 1 (après la séquence 6 « Des problèmes environnementaux ») montrent également la présence dans le discours de trois élèves, « moyenne » (E11), « faible » (E12) et « forte » (E13), de concepts tels que le réchauffement climatique ou l'acidification des océans causée par les activités humaines industrielles, alors que les problèmes environnementaux ne sont pas spontanément cités par les élèves dans l'entretien post-observations en phase 2. Rappelons que l'étude de ces deux problèmes environnementaux faisait l'objet de l'évaluation selon la modalité de la « classe renversée » (au sens de Cailliez & Henin, 2017) dans la séquence ordinaire de Gauthier. Mais nous manquons d'indices dans le discours de l'élève le plus faible (E12) pour comprendre si le lien est fait entre le dioxyde de carbone produit dans l'atmosphère par les usines selon une réaction de combustion et le dioxyde de carbone qui réagit avec l'eau composant l'hydrosphère et provoquant une diminution du pH, donc un risque pour les écosystèmes (Extrait 18).

- 8) E12 : et par exemple on parle heu si heu on dégage de l'énergie dans le ciel  
heu c'qui va se passer ou ça va endommager par exemple quels lieux ça peut par  
exemple heu se rendre dans un lac ben ça peut l'endommager les poissons les fonds  
etc
- 9) Ch : ok
- 10) E12 : et voilà
- 11) Ch : et du coup ça s'est organisé comment vous avez fait qu'est-ce que vous  
avez fait dans les détails tu te souviens↑
- 12) E12 : heu non je sais pas
- 13) Ch : vous avez fait différentes activités↑
- 14) E12 : ouais on a fait plein de petites activités par exemple on a fait une  
activité sur heu une usine qui était à côté qu'un lac et il fallait dire combien  
y avait heu «fin si heu si c'était grave si elle allait hum si par exemple le co2  
il allait dans le lac
- 15) Ch : d'accord vous avez parlé du co2↑
- 16) E12 : oui
- 17) Ch : mh qu'est-ce que c'est le co2 tu saurais m'expliquer↑
- 18) E12 : heu oui c'est le dioxyde de carbone
- 19) Ch : ouais et c'est quoi les conséquences si
- 20) E12 : ben nous par exemple pour respirer et ça peut tuer les poissons les  
animaux

- |   |
|---|
| 21) Ch : donc y'a un risque pour l'environnement, |
| 22) E12 : ouais                                   |

*Extrait 18: entretien post-observations avec E11 — Classe de Gauthier (phase 1 — séquence 6  
« Des problèmes environnementaux ») [00 : 42 à 01 : 41]*

On observe également une confusion entre l'énergie et le dioxyde de carbone produit par les centrales thermiques (les usines). En effet, en plus de la modélisation du fonctionnement de l'usine comme une réaction de combustion, l'une des activités proposées dans la séquence 6 de Gauthier consistait en le bilan énergétique de ce dispositif technique. Il semblerait que les deux enjeux d'apprentissage se confondent chez cet élève. Il est intéressant de relever que la confusion transformation d'énergie/transformation de la matière est retrouvée en phase 2 chez E11 (élève moyenne) qui mentionne des échanges de chaleur dans le cycle du carbone. En effet, la structure de la séquence 2 « L'impact de l'être humain sur le cycle du carbone » reprend l'alternance d'enjeux relatifs à la physique (énergies) et à la chimie (transformation chimique). Cette structure pourrait être à la source des confusions des élèves qui ne maîtrisent pas encore suffisamment le modèle de la réaction chimique pour interpréter des situations plus complexes. Il est probable que la mise en œuvre de la codisciplinarité par Gauthier qui propose une séance très riche où s'entremêlent des savoirs de chimie, de physique et étude d'un problème complexe ne permettent pas aux élèves, en particulier celles et ceux qui ont de moins bons résultats, de toujours repérer les enjeux du contrat didactique et donc d'entrer dans l'acquisition des savoirs visés. De plus, le partage des responsabilités observé au cours de cet extrait s'organise en faveur du surplomb de l'enseignant. Les élèves n'ont pas accès à l'élaboration du problème ou à sa résolution, ce qui entrave leur accès aux savoirs en cours de construction.

## 10.2.2 Aurélie et Nino : deux exemples de gestion difficile de la codisciplinarité

### 10.2.2.1 Le cas d'Aurélie : introduction et disparition

En phase 2 chez Aurélie, le cycle du carbone intervient dès le début de la séance 1 (Figure 115).

Enjeux de la séquence (N+1)	Enjeux N
Etude des transformations chimiques impliquées dans le cycle du carbone : introduction modèle de la réaction chimique et des concepts associés (équation de réaction et principe de conservation)	Présentation du cycle du carbone holocène et réflexion sur l'origine du dioxyde de carbone atmosphérique <b>N1</b> <i>Séance 1 [7min30]</i>
	Définition de la transformation chimique <b>N2</b> <i>Séances 1 [24min]</i>
	Présentation du cycle du carbone anthropocène et origine anthropique du dioxyde de carbone atmosphérique <b>N3</b> <i>Séance 1 [5min]</i>
	Définition de l'équation de réaction chimique <b>N4</b> <i>Séance 1 [2min]</i>
	Définition de la transformation chimique en comparaison à la transformation physique <b>N5</b> <i>Séance 1 [8min30]</i>
	Etude qualitative de la réaction du bicarbonate de soude avec l'acide acétique : identification d'un changement de substance <b>N6</b> <i>Séances 1 et 2 [28min]</i>
	Distinction des transformation chimique, transformation physique et mélange <b>N7</b> <i>Séance 2 [14min]</i>
	Etude quantitative de la réaction du bicarbonate de soude avec l'acide acétique : principe de conservation de la matière <b>N8</b> <i>Séance 3 [50min30]</i>
	Etude du cas des combustions (TP réaction de combustion du butane) : illustration des principes introduits précédemment <b>N9</b> <i>Séances 4 et 5 [1h 35min]</i>
	Conclusion sur le cycle du carbone : conséquences des activités humaines sur l'environnement <b>N10</b> <i>Séance 5 [3min]</i>

Figure 115 : synopsis de la séquence d'Aurélie en phase 2

Nous avons expliqué dans le chapitre 9 (cf. 9.1.1.3) que le synopsis de la séance 1 de cette enseignante présente une alternance d'enjeux relativement courts (moins de dix minutes) relatifs à l'étude de l'origine du réchauffement climatique soulevée par le cycle du carbone, et d'enjeux orientés vers l'introduction du modèle de la réaction chimique (Figure 116). En effet, au cours du deuxième entretien de préparation, nous avons suggéré à Aurélie de présenter le cycle du carbone avant l'introduction des définitions qui constituaient l'ouverture de sa séquence ordinaire. Nous avons montré dans le chapitre 9 que cette suggestion avait en quelque sorte rompu le contrat de recherche qui reposait jusqu'alors sur l'autonomie de l'enseignante dans la conception de sa séquence. Aussi, nous formulons l'hypothèse

selon laquelle notre posture en entretien a contraint Aurélie à modifier en profondeur la structure de cette première séance.

Enjeux de niveau N	Phases de l'action (étapes ou organisation pour atteindre l'enjeu)
Présentation du cycle du carbone holocène et réflexion sur l'origine anthropique du dioxyde de carbone atmosphérique <b>N1</b> [7min33]	Lecture du cycle du carbone <b>N11</b> [00 :00 à 03 :07 / TdP 1 à 19]
	Interprétation des flèches en termes de substances consommées et produites <b>N12</b> [03 :07 à 07 :33 / TdP 19 à 61]
Définition de la transformation chimique <b>N2</b> [24min]	Définition générale de la transformation <b>N21</b> [07 :33 à 11 :57 / TdP 61 à 93]
	Définition de la transformation physique <b>N22</b> [11 :57 à 12 :21 / TdP 93]
	Définition de la transformation chimique <b>N23</b> [12 :21 à 31 :37 / TdP 94 à 156]
Présentation du cycle du carbone anthropocène et origine anthropique du dioxyde de carbone atmosphérique <b>N3</b> [5min]	Comparaison du cycle holocène et du cycle anthropocène <b>N31</b> [31 :37 à 34 :21 / TdP 156 à 182]
	Conclusion à l'échelle de l'environnement <b>N32</b> [34 :21 à 36 :31 / TdP 182 à 185]

Figure 116 : extrait du synopsis de la séance 1 d'Aurélié (phase 2)

L'extrait de synopsis présenté dans la figure ci-dessus ne présente pas de sous-enjeux de niveau N-1, en effet nous n'avons pas jugé nécessaire de découper les enjeux de niveaux N à un niveau plus fin, la détermination des phases de l'action étant relativement aisée pour cette séance. Une fois de plus, la colonne des micro-événements liés aux objets n'est pas reportée ici, afin de faciliter la lecture.

#### 10.2.2.1.1 Présentation de l'extrait « un cycle du carbone déséquilibré »

L'extrait significatif qui nous intéresse intervient au cours de l'enjeu N3 qui consiste en la présentation du cycle du carbone anthropocène et à une première réflexion sur l'origine du dioxyde de carbone atmosphérique, entre les minutes 33 : 19 et 36 : 31 (Extrait 19).

Comme le montre le synopsis de la séance (Figure 115), cet enjeu est précédé par la présentation du cycle du carbone holocène (N1), qui permet une première interprétation des flèches en termes de flux de substances (phase de l'action N12), ainsi que par un enjeu plus long dédié à la définition de la transformation chimique (N2). Au cours de la phase de l'action N32, le cycle du carbone anthropocène est présenté comme le schéma de référence pour la modélisation de différentes transformations chimiques.

156) Ens : (le cycle du carbone s'affiche au tableau) donc on retourne à notre cycle du carbone regardez là le cycle qui est affiché et le cycle que vous avez sur le polycopié est-ce que c'est le même↑

157) Els : non

158) Ens : pourquoi El-Li

159) El-Li : parce que déjà il y a plus de flèches heu vers la gauche (sur le polycopié le cycle du carbone prend en compte les activités humaines alors qu'au tableau c'est le cycle naturel)

160) Ens: oui

161) El-Li: et là il montre qu'y a qu'y a du feu sur la septième heu flèche j'crois

162) Ens: oui septième oui

163) El-Li: du feu

164) Ens: chut

165) El-Li: et y en a une en plus heu sur la sixième là ils montrent des usines

166) Ens: très bien effectivement El-Li donc en fait qu'est-ce que je vous ai mis là comme c'est toujours un cycle du carbone, mais j'vous ai mis quoi là (*montre le document photocopié – la sonnerie de la récréation des troisièmes*)

167) El-Lat: ben hum là-bas c'est c'qui c'qui est c'qui est genre heu naturel qui était déjà et heu c'que vous avez rajouté c'est c'qui a été construit

168) Ens: très bien donc (*remarque discipline*) vous c'que vous avez sur votre feuille effectivement c'est le cycle du carbone en intégrant les activités humaines c'que nous on va avoir comme impact c'qu'on rajoute si y avait pas l'être humain en tout cas si on avait pas autant d'activités qu'on était heu des êtres heu vivants comme les animaux c'est à dire qu'on a on avait pas d'usines etc hein juste on respire et ben on s'en on aurait que ça comme cycle du carbone (*montre le cycle naturel affiché au tableau*), mais les êtres humains on fait pas que respirer on a aussi des centrales on a pas mal de choses d'accord on va mettre le feu et y en a qui sont qui mettent le feu aux forêts etc bref donc ça va rajouter chut ça va rajouter d'autres flèches que vous avez j'vais vous les montrer j'vais l'afficher là le cycle hop voilà (*affiche le cycle au tableau*) et vous voyez comme du coup vous croyez pas qu'il y a un petit changement par rapport à précédemment au niveau des émissions et des absorptions qu'est-ce qu'on peut dire (*fait signe d'une balance avec les deux mains*)

169) Els: heu

170) Ens: (*donne la parole à El-La*)

171) El-La: que ya moins de de forêts

172) Ens: oui, mais c'est pas ça qui est moi j'parle comparez vraiment le nombre de flèches en rouge et le nombre de flèches en vert là avec l'activité humaine et maintenant sans l'activité humaine (*donne la parole à El-Yan*)

173) El-Yan: ben avec l'activité humaine ben y a beaucoup de choses qui montent et sans l'activité humaine et ben y a

174) Ens : alors c'est quoi beaucoup de choses qui montent ça veut dire quoi↑

175) El-Yan: ben le heu le carbone

176) Ens: oui le carbone quoi

177) El-Yan: l'émission de carbone

178) Ens: oui heu El-Ta est-ce que tu peux compléter la réponse de El-Yan↑

179) El-Ta: heu ben en fait heu quand à cause de l'émission des humains ben y a plus de d'émissions de carbone que de heu d'absorption de carbone

180) Ens: oui d'absorption d'absorption effectivement donc le cycle du carbone il est pas un peu déséquilibré↑

181) Els : si si

182) Ens: hein nous on finalement à cause de l'activité que les êtres humains peuvent avoir hein les centrales thermiques heu les incendies etc bon bref on va produire émettre beaucoup de carbone beaucoup plus que finalement on peut en absorber que la photosynthèse ou heu la la flèche en trois que vous voyez l'absorption par les sols peut heu ne le permet d'accord (*donne la parole à El-Sal qui lève la main*)

183) El-Sal: quand on est là et qu'il y a des villes et tout il y a beaucoup plus de de heu émissions de carbone que que que le rejet et quand on est pas là et ben c'est égale

184) Ens: à peu près ou c'est ça on va dire alors j'ai pas les valeurs en tête vous avez dans la légende vous avez des explications mais on n'a pas on n'a j'en on en a enlevé peut-être là y avait effectivement (*affiche le cycle du carbone naturel*) là si on regarde on vous donne la quantité qui est émise la quantité qui est absorbée et on voit que finalement ça s'équilibre à peu près bon que pas pas oui c'est

185) El-?: gigatonnes†

186) Ens: oui gigatonnes mais heu qu'est-ce que je voulais dire en tout cas on voit que sans là sans le volcan c'est à peu près équilibré (*affiche le cycle du carbone avec les activités humaines*) là y a pas les quantités qu'on été affichées mais clairement y a un déséquilibre et nous on va voir qu'en fait donc ça on en reparlera après du réchauffement climatique etc dans l'année là dans le chapitre et on va en parler mais surtout c'qu'on va faire c'est qu'on va étudier différente transformations qu'on voit ici

*Extrait 19: « un cycle du carbone déséquilibré » chez Aurélie (phase 2 — séance 1) [33 : 19 à 36 : 31]*

Étudions précisément ce qui se joue dans cet extrait du point de vue de l'élaboration du milieu, de la gestion des territoires et de la gestion des temporalités.

#### *10.2.2.1.2 Éléments de la relation contrat didactique-milieu*

Au début de l'extrait, le milieu est composé d'un élément symbolique : la représentation du cycle du carbone holocène projetée au tableau. Les élèves ont également à disposition un document définissant la transformation chimique comme un changement de molécules et le cycle du carbone anthropocène, que nous avons proposé à Aurélie, accompagné de sa légende (cf. annexe 34).

L'enseignante commence en posture d'accompagnement en confiant aux élèves la responsabilité de comparer le cycle du carbone holocène et le cycle du carbone anthropocène. Les élèves occupent cette responsabilité en remarquant que les deux cycles sont différents. Aurélie, toujours en posture d'accompagnement, demande à El-Li d'indiquer comment se caractérisent ces différences. L'élève occupe cette responsabilité en citant successivement le nombre de flèches rouges supérieur au nombre de flèches vertes, l'icône du feu qui symbolise la déforestation et l'icône des usines qui représente les activités industrielles. Ces trois traits pertinents accélèrent le temps didactique.

L'enseignante occupe transitoirement une posture de surplomb pour instituer ces éléments dans le milieu, puis elle confie aux élèves la responsabilité de les interpréter comme les effets des activités humaines. El-Lat se saisit de cette responsabilité en interprétant le cycle holocène comme « naturel » et

le cycle anthropocène comme représentant « ce qui a été construit ». Avec ce trait pertinent, elle explicite la vision dualiste, qui considère l'espèce humaine comme opposée à la nature, sous-jacente à la représentation des deux cycles du carbone introduits dans la séquence, le temps didactique avance. Aurélie se place alors en posture de surplomb pour instituer la réponse de El-Lat puis pour faire le bilan des flèches d'origine humaine sur le cycle du carbone anthropocène. Ce bilan reprend non seulement les phénomènes communs à tous les êtres humains (la respiration), mais aussi ceux qui sont propres aux sociétés industrialisées (les combustions dans les centrales à charbon et la déforestation). Ainsi, Aurélie dévolue l'identification de l'augmentation du dioxyde de carbone atmosphérique aux élèves. Elle les guide en mimant les plateaux d'une balance déséquilibrée avec ses mains. El-Lat se saisit en premier de cette responsabilité en indiquant la diminution des espaces forestiers. Cette réponse est pertinente si on se focalise sur le compartiment biosphère, mais l'enseignante attend une réponse à l'échelle de l'ensemble du cycle en termes de dioxyde de carbone émis et consommé. Aussi ce trait non pertinent ralentit temporairement le temps didactique. Face à ce ralentissement, Aurélie adopte une posture de surplomb. Pour redéfinir ses attentes, elle pointe explicitement le nombre de flèches rouges sur les deux cycles du carbone. Cette régulation de l'enseignante permet à El-Yan d'occuper la responsabilité en identifiant « beaucoup de choses qui montent ». Aurélie l'accompagne dans la reformulation de sa réponse, si bien qu'il finit par produire un trait pertinent qui fait avancer le temps didactique : « l'émission de carbone », bientôt renforcée par une reformulation de El-Ta.

Dans cette expression, le carbone fait référence à une unité de mesure des gaz à effet de serre, l'équivalent carbone, très utilisée dans les modèles bio-géo-chimiques tels que le cycle du carbone (cf. 4.3.1). Du point de vue du modèle épistémologique des savoirs en chimie, on se situe alors au niveau de la réalité idéalisée. Aurélie se place en posture de surplomb pour instituer les réponses de El-Yan et El-Ta et introduire dans le milieu la question du déséquilibre du cycle du carbone anthropocène, provoquant une avancée du temps didactique. À travers cette intervention, elle met en perspective les grandes quantités de carbone émises par les activités humaines et les faibles quantités absorbées notamment par la photosynthèse. Remarquons qu'Aurélie reprend dans son discours l'idée d'équivalent carbone, sans faire mention du dioxyde de carbone, alors même que c'est cette forme de stockage du carbone dans l'atmosphère qui pose un problème du point de vue du réchauffement climatique. Pour l'instant, le dioxyde de carbone est un implicite dans le milieu. El-Sal propose une reformulation de ce qui vient d'être institué par l'enseignante, en soulignant notamment le rôle des sociétés industrialisées dans l'augmentation de l'émission de carbone à travers la mention des villes. Au cours de cette intervention, la chronogenèse stagne.

Aurélie poursuit en posture de surplomb en revenant au cycle du carbone holocène pour comparer le nombre de flèches rouges au nombre de flèches vertes et mettre en évidence l'équilibre du cycle « naturel ». Avec cette démarche, elle évacue explicitement la question de la quantification : « j'ai pas les valeurs en tête ». La représentation du cycle holocène que nous avons pensée met effectivement en évidence un certain équilibre (trois flèches vertes pour trois flèches rouges), mais sans considérer le fait que le volcanisme émet cent fois moins<sup>95</sup> de gaz à effet de serre dans l'atmosphère que les phénomènes

---

<sup>95</sup> Par cohérence avec nos analyses, nous reprenons les données fournies par les MER SHS31 en accompagnement du cycle du carbone que nous proposons aux enseignants et enseignantes. Néanmoins, nous retrouvons des données différentes dans la littérature. Par exemple, un groupe de travail du GIEC propose un rapport de 1100 entre les quantités de dioxyde de carbone produites par les respirations et les incendies et celles issues du volcanisme (GIEC, 2013, p. 471). Il semblerait que les ordres de grandeur dépendent des modèles.

de respiration (CIIP, 2010g). Pourtant ce raisonnement suffit pour l'enjeu associé à cet extrait : introduire l'idée que le cycle du carbone est déséquilibré par les activités humaines industrielles.

Aussi, Aurélie conclut en posture de surplomb en introduisant dans le milieu le réchauffement climatique comme une des questions étudiées dans la séquence, mais surtout en interprétant chaque flèche du cycle du carbone comme une transformation chimique qui va être modélisée comme une réaction chimique au cours des séances suivantes.

**Pour résumer, dans cet extrait, Aurélie souhaite introduire l'étude des transformations chimiques par un problème environnemental. Il s'agit dans un premier temps de mettre en évidence le « déséquilibre » du cycle du carbone causé par les activités d'origine anthropique. Pour cela, l'enseignante s'appuie sur la comparaison des deux représentations du cycle, holocène et anthropocène. Elle confie aux élèves la responsabilité de cette comparaison et les guide vers l'identification du plus grand nombre de flèches rouges par rapport aux flèches vertes. Pour interpréter cette différence comme l'origine d'un problème environnemental, Aurélie dévolue aux élèves la responsabilité d'interpréter les flèches rouges comme représentant des phénomènes producteurs de gaz à effet de serre. Or, à ce moment de la séquence, les élèves n'ont pas encore abordé le modèle de la réaction chimique. La réponse apportée dans le milieu par un élève se situe donc dans le domaine de la biologie/géologie et consiste à appliquer la légende du schéma : les flèches rouges représentent une « émission de carbone » dans l'atmosphère. L'enseignante prend la responsabilité de rapprocher ce type d'émission du phénomène de réchauffement climatique. Mais cette conclusion sert surtout à Aurélie de transition vers la prochaine séance en identifiant les flèches du cycle du carbone comme des transformations chimiques dont certaines vont être étudiées en détail.**

#### *10.2.2.1.3 Interprétations*

Comme nous l'avons montré chez Gauthier précédemment (Extrait 15), dans l'extrait « un cycle du carbone déséquilibré » chez Aurélie, le cycle du carbone fait fonction de contexte pour introduire le modèle de la réaction chimique.

Du point de vue des critères de codisciplinarité, les conditions préalables semblent satisfaites avec la réflexion sur l'origine anthropique du déséquilibre du cycle du carbone (CP1) et la présence dans le milieu de modèles relatifs à la biologie, à la géologie et à la chimie (CP2). L'étude du problème environnemental émerge peu à peu au fil de l'extrait notamment grâce à l'alternance par l'enseignante de postures d'accompagnement et de surplomb (I1). Les flèches sont modélisées dans le registre de la biologie/géologie comme des flux de matière, mais le modèle de la réaction chimique présenté juste avant cet extrait (enjeu N2) est annoncé comme permettant d'interpréter les différents phénomènes mis en jeu dans le cycle du carbone, en particulier pour comprendre le réchauffement climatique (I2). Cependant, le discours des sujets se restreint au domaine de la biologie/géologie en mobilisant l'unité d'équivalents carbone (I3) et nous relevons peu de mise en relation explicite des différents modèles présents dans le milieu (I4). En effet, dans cet extrait, l'objectif semble plutôt se porter sur la mise en évidence du problème à étudier : l'origine anthropique du réchauffement climatique, son étude effective à travers l'articulation des différents modèles étant annoncée pour la suite de la séquence (I5) (Figure 117).

CP1: Traitement d'un problème complexe	CP2: Au moins deux matrices disciplinaires sont présentes	I1: Identifier le problème/la question/la tâche	I2: Les caractéristiques importantes des objets de savoir sont présentes dans le milieu	I3: Certains objets de savoir sont mis en tension dans le milieu	I4: Le phénomène est interprété à l'aide de différents modèles disciplinaires	I5: La mise en relation des modèles permet de répondre à la question/au problème initial
oui	oui	la comparaison des deux cycles du carbone met en évidence un déséquilibre d'origine anthropique	flux de matière, transformations chimiques, réchauffement climatique	« déséquilibre » du cycle vs de réchauffement climatique, équivalents carbone	non	annoncé pour la fin de la séquence

Figure 117 : tableau récapitulatif des critères de codisciplinarité reconstruits à travers l'extrait « un cycle du carbone déséquilibré » chez Aurélie (phase 2)

Ainsi, l'enseignement du modèle de la réaction chimique et des concepts associés (réactif, produit, équation de réaction) apparaît comme un préalable pour l'étude du problème complexe. C'est un résultat que nous avons également trouvé dans l'analyse des séquences de Nino et de Gauthier dans le chapitre précédent (Chapitre 9). Cependant, nous ne trouvons pas de retour au cycle du carbone explicite dans la suite de la séquence d'Aurélie, avant les trois minutes finales de la dernière séance (séance 5) que nous analyserons dans la section 10.2.3. En effet, les transformations chimiques mises à l'étude par cette enseignante sont soit déconnectées du cycle du carbone — c'est le cas de la réaction du bicarbonate de soude avec l'acide acétique —, soit décontextualisées de la situation initialement présentée comme le « fil rouge de la séquence » — l'expérience de combustion du butane qui n'est pas explicitement mise en relation avec une flèche du cycle du carbone anthropocène. Il semblerait qu'Aurélie ait reproduit les séances qu'elle avait conçues pour sa séquence ordinaire, sans les mettre en relation avec le cycle du carbone.

Ces résultats vont dans le sens de l'hypothèse que nous formulions au moment de l'analyse du second entretien de préparation. La séance 1 conçue par Aurélie intègre le cycle du carbone sous l'influence de nos recommandations, mais vraisemblablement sans qu'elle saisisse son potentiel didactique. Aussi cette dimension se dissipe dans le reste de la séquence, alors que la contrainte des demandes de la chercheuse est levée. Dans les faits, les enjeux d'enseignement-apprentissage associés à cette séquence se concentrent majoritairement sur la modélisation des phénomènes, en particulier à l'aide de l'équation de réaction chimique. Des éléments d'analyse du rapport au savoir d'Aurélie renforcent ce constat.

#### 10.2.2.1.4 Étude du rapport au savoir de l'enseignante

L'étude du discours d'Aurélie au cours de l'entretien post-observations (Extrait 20) renforce la fonction de contextualisation accordée au cycle du carbone que nous avons relevée dans l'analyse de la relation contrat didactique-milieu.

120) Ens: heu non j'trouve que ça s'est intégré pas trop mal parce que heu finalement j'te dis dans tout c'que faisais heu précédemment ça reprenait sans faire le lien avec le cycle du carbone mais ça reprenait des transformations qu'il y a dans le cycle du carbone

Extrait 20: extrait de l'entretien post-observations avec Aurélie (phase 2) [07 : 49 à 08 : 01]

Ces éléments de discours se retrouvent dans les pratiques de l'enseignante. En effet, l'analyse à l'échelle micro d'extraits significatifs de la pratique d'Aurélié montre peu de liens entre l'étude des réactions chimiques au cours des séances 2, 3, 4 et 5 (Figure 115) et la conclusion à propos de l'origine anthropique du réchauffement climatique en fin de séance 5. Le cycle du carbone est explicitement présenté comme le support pour l'étude de « différentes transformations » au cours de la séance 1 (Extrait 19).

Ces résultats apportent des indices supplémentaires quant à la définition des objectifs de la séquence, selon cette enseignante, à savoir l'appropriation du modèle de la réaction chimique, en particulier à travers l'écriture des équations de réaction. La mise en perspective d'extraits de l'entretien post-observations où Aurélié fait explicitement mention de cet exercice avec d'autres éléments de sa pratique qui font une large place aux exercices « d'entraînement » viennent renforcer ce constat (Extrait 21).

144) Ens: j'pense que l'équation heu c'est compliqué, «fin peu importe heu peut-être qu'un jour j'trouverai un moyen où la fin tout le monde aura compris mais tu vois bon après étonnamment j't'ai dit dans le tp y'en a y'a El-Sa donc le groupe donc forcément du coup il a amené son groupe aussi à à on va dire à réussir cette partie-là et y'a un autre groupe heu le groupe que tu filmais les mains tu sais El-Ta El-Ma et hum El-Sa

145) Ch: oui

146) Ens: elles c'est pareil elles elles ont elles ont assez elles avaient écrit l'équation de base toutes seules

147) Ch: d'accord

148) Ens: après pour équilibrer j'ai dû un peu les les guider

149) Ch: mmh

150) Ens: mais elles avaient mis elles m'avaient écrit correctement toutes les formules des molécules

151) Ch: d'accord

152) Ens: tout dans l'ordre comme il fallait / elles avaient bien rédigé et elles avaient compris qu'il fallait quand même équilibrer

153) Ch: d'accord

154) Ens: après bon, heu de là à trouver quel coefficient on va mettre ça c'est autre chose parce que

155) Ch: mmh

156) Ens: c'est plus trop au programme tu vois j'insiste pas trop

157) Ch: oui

*Extrait 21: extrait de l'entretien post-observations avec Aurélié (phase 2) [09 : 27 à 10 : 12]*

Les éléments de la posture épistémologique d'Aurélié mis en perspective avec la nature du savoir en jeu dans l'extrait « un cycle du carbone déséquilibré » et la stratégie didactique adoptée permettent de reconstruire la configuration didactique relative à cet extrait, élément complémentaire pour la discussion des résultats.

#### *10.2.2.1.5 Discussion des configurations didactiques*

Dans l'extrait « un cycle du carbone déséquilibré », la nature plurielle des savoirs, la stratégie didactique problématique et la posture épistémologique réaliste critique adoptée par Aurélié correspondent à une configuration didactique problématisante (Simonneaux, 2011, p. 149) (Figure 118).

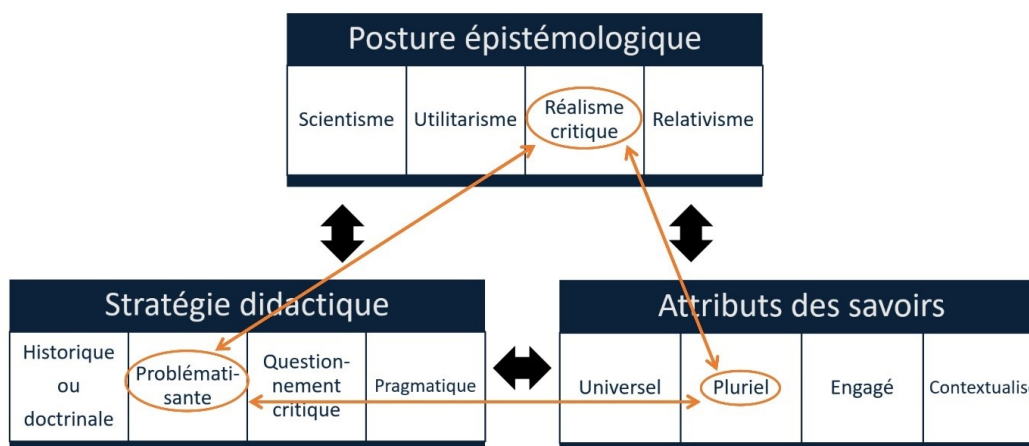


Figure 118 : configuration didactique reconstruite à partir de l'extrait « un cycle du carbone déséquilibré »

L'enseignante cherche en effet à rendre les élèves acteurs et actrices de leurs apprentissages, en particulier à travers la co-construction d'un problème. Aussi la communication se fait selon un mode interactif (Simonneaux, 2011, p. 144). Aurélie alterne entre postures de surplomb et d'accompagnement pour confier une partie de l'élaboration du milieu aux élèves tout en gardant la main sur les moments de définition, de régulation ou d'institution. Selon Simonneaux (2011), la configuration problématisante peut être plus orientée vers la construction du problème que vers la recherche de solution. L'extrait « un cycle du carbone déséquilibré » montre en effet une centration sur la mise en évidence d'un problème environnemental : l'origine anthropique du réchauffement climatique, sans y répondre immédiatement. La construction d'une réponse est annoncée comme un des enjeux de la suite de la séquence. L'analyse d'un dernier extrait issu de la séance 5 d'Aurélié ainsi que l'étude du discours des élèves en entretiens post-observations (cf. 10.2.3.2) devraient nous apporter des indices sur la mise en œuvre et l'atteinte de cet objectif.

#### 10.2.2.2 Le cas de Nino : prédominance de la matrice disciplinaire « biologie »

Nous avons montré dans le chapitre 9 qu'à l'échelle d'analyse méso, la séquence de Nino évolue vers l'étude de l'anthropocène à la suite de l'introduction du cycle du carbone. L'étude de l'origine anthropique du réchauffement climatique est notamment permise par la modélisation des flèches du cycle du carbone comme des réactions chimiques (Figure 119).

Enjeux de la séquence (N+1)	Enjeux N
Modélisation de la transformation chimique par les réactions chimiques et étude des concepts associés (équation, réactif, produit)	Présentation des objectifs du chapitre <b>N1</b> <i>Séance 1 [1min45]</i>
	Etude de la réaction d'électrolyse de l'eau : définition de la transformation chimique <b>N2</b> <i>Séance 1 [27min]</i>
	Modélisation microscopique de l'électrolyse de l'eau : écriture et équilibre de l'équation de réaction <b>N3</b> <i>Séance 2 [1h]</i>
	Etude du cas de combustion du fer : mise en évidence de la conservation de la masse au cours de réaction <b>N4</b> <i>Séance 2 [13min40]</i>
	Etudes de combustions en jeu dans le cycle du carbone : écriture d'équations de réaction et lien avec le réchauffement climatique <b>N5</b> <i>Séance 3 [1h07min20]</i>
	Etude des cas de combustion du dihydrogène et du butane : mise en relation des niveaux de modèle macroscopique et microscopique <b>N6</b> <i>Séance 3 [21min]</i>

Figure 119 : synopsis de la séquence de Nino en phase 2

Une partie de la séance 3 est consacrée à cet exercice de modélisation, en appui sur la représentation du cycle du carbone (enjeux N52, N53, N54 et N55). Les extraits que nous choisissons d'analyser à l'échelle micro concernent l'étude des réactions de respiration animale (phase de l'action N55a) et de photosynthèse (N55b) (Figure 120).

Enjeux de niveau N	Enjeux ou tâches de niveau N-1	Phases de l'action (étapes ou organisation pour atteindre l'enjeu)
Etudes de combustions en jeu dans le cycle du carbone : écriture de l'équation de réaction et lien avec le réchauffement climatique <b>N5</b> [1h07min20]	Etude du modèle du cycle du carbone : introduction des questions environnementales liées aux activités humaines <b>N52</b> [12 :30 à 18 :00/ TdP 1 à 56]	Présentation du cycle du carbone <b>N52a</b> [12 :30 à 13 :52/ TdP 1 à 17]
		Interprétation macroscopique des flèches du cycle <b>N52b</b> [13 :52 à 15 :30/ TdP 18 à 35]
		Quantification des différentes flèches : introduction des questions environnementales <b>N52c</b> [15 :30 à 18 :00/ TdP 35 à 56]
	Etude de la combustion du charbon <b>N53</b> [18 :00 à 34 :13/ TdP 56 à 167]	Rappel sur la combustion <b>N53a</b> [18 :00 à 21 :31/ TdP 56 à 75]
		Réalisation de l'expérience de combustion du charbon dans le dioxygène <b>N53b</b> [21 :31 à 30 :35/ TdP 76 à 135]
		Identification du produit de la réaction <b>N53c</b> [30 :35 à 32 :44/ TdP 135 à 153]
		Modélisation de la transformation par l'équation de réaction chimique : rappel des concepts de réactif et produit <b>N53d</b> [32 :44 à 34 :13/ TdP 153 à 167]
		Mise en relation des modèles du cycle du carbone et de la réaction chimique <b>N53e</b> [34 :13 à 34 :51/ TdP 167]
	Etude des combustions du méthane et du butane <b>N54</b> [34 :51 à 54 :10 / TdP 167 à 280]	Réalisation de l'expérience de combustion du méthane <b>N54a</b> [34 :51 à 37 :41/ TdP 167 à 197]
		Modélisation de la transformation par l'équation de réaction chimique <b>N54b</b> [37 :41 à 42 :36/ TdP 198 à 248]
		Identification macroscopique du produit de la réaction <b>N54c</b> [42 :36 à 43 :23/ TdP 248 à 254]
		Mise en relation des modèles du cycle du carbone et de la transformation chimique <b>N54d</b> [43 :23 à 49 :06/ TdP 254]
		Rédaction du bilan écrit <b>N54e</b> [49 :06 à 52 :00/ TdP 254 à 268]
		Démonstration (vidéo) de l'expérience de combustion du butane <b>N54f</b> [52 :00 à 54 :10 / 268 à 280]
	Etude des réactions de combustion de respiration et photosynthèse <b>N55</b> [52 :00 à 01 :09 :30 / 268 à 429]	Etude de la réaction de respiration animale <b>N55a</b> [54 :10 à 59 :00 / 280 à 342]
		Etude des réactions de respiration végétale et de photosynthèse <b>N55b</b> [59 :00 à 01 :03 :00/ 343 à 400]
		Mise en relation des modèles du cycle du carbone et de la réaction chimique : lien avec les questions environnementales <b>N55c</b> [01 :03 :00 à 01 :09 :30/ 400 à 429]

Figure 120 : extrait du synopsis de la séance 3 de Nino (phase 2)

#### 10.2.2.2.1 Présentation de l'extrait « respiration et pain au chocolat » et éléments d'analyse de la relation contrat didactique-milieu

L'étude de la réaction de respiration animale (Extrait 22) intervient après la modélisation de la combustion du charbon (N53), de celle du méthane (N54) et du butane (N54f), entre les minutes 54 : 10 et 59 : 00.

Le synopsis de séance met en évidence un motif qui se répète au niveau des phases de l'action de ces enjeux : réalisation de l'expérience, interprétation au niveau de la réalité idéalisée (identification des réactifs et des produits), modélisation au niveau microscopique à travers l'écriture de l'équation de réaction, mise en relation des modèles de la réaction chimique et du cycle du carbone. Ce motif n'est pas visible pour l'étude des réactions de respiration animale et de photosynthèse à l'échelle méso du synopsis de séance, l'analyse à un grain plus fin devrait nous renseigner à ce sujet.

280) Ens: là c'que vous remarquez c'est qu'à chaque fois vous avez du co2 qui est produit la dernière chose c'est en fait puisqu'on s'est occupés pour l'instant on s'est occupés on s'est occupés de cette usine (remarque discipline) la dernière chose j'aimerais qu'on s'occupe de ceci (entoure les arbres et les animaux sur le cycle) alors pour moi c'est important parce qu'en réalité vous remarquez que les les petits la petite forêt qui est là on la retrouve aussi ici↓ parce que souvent on fait des approximations heu dans le cas ici c'est marqué sucre heu dans le cas des organismes vivants ils produi ils font aussi une combustion d'accord j'vous rappelle la combustion c'est un combustible plus de l'oxygène

280) Ens : dans le cas des organismes vivants le combustible alors y'en a différents un combustible qui est facile à mettre en équation c'est celui du glucose d'accord du sucre ce combustible c'est ça (écrit en même temps) c'est  $C_6H_{12}O_6$ ↓

281) El? : vous vous rappelez de tête↓

282) Ens: oui oui ce combustible / on va le il s'agit d'une combustion donc qu'est ce que l'on fait↓ on doit rajouter quoi↓

283) El? : ben  $O_2$

284) Ens: ok↓ heu dans votre cas je le ne vous le fais pas faire mais dans votre cas comment est-ce que vous faites vous pour rajouter  $O_2$  à votre combustible / la question semble semble triviale mais comment est-ce que vous faites (*remarque discipline*) comment est-ce que vous faites pour ajouter  $O_2$  à votre combustible votre combustible c'est votre petit pain au chocolat comment vous faites pour ajouter  $O_2$ ↓

285) El-En: ben on souffle dedans

286) Ens: non vous soufflez pas dans votre pain au chocolat

287) El-En: on le mange

288) Ens: en dixième année en dixième année on leur on vous pose la question de savoir en fait heu à quoi ça sert de respirer et votre réponse c'est toujours pour vivre /

289) El-Ma: non pour faire fonctionner le corps

290) Ens: en l'occurrence pour quelle raison est-ce que tu respire

291) El-En: pour faire fonctionner les poumons

292) El? : pour alimenter

293) Ens: non c'est pas pour faire fonctionner les poumons↓ pour quelle raison est-ce que vous respirez

294) El? : le cerveau il a besoin d'alimenter

295) El-Sh: pour avoir de l'oxygène

296) Ens: oui pour faire quoi↓ de cet oxygène

297) El? : alimenter le sang

298) Ens : pour faire quoi cet oxygène↓ hé on a dépassé le stade donc c'est pour alimenter les cellules et autre / on a dépassé quoi↓

299) El? : pour faire bouger les muscles

300) Ens: ok / qu'est-ce qui qu'est-ce que c'est que ceci (*pointe un molécule sur le cycle du carbone*)

301) El-Sh: une formule chimique

302) Ens: qui représente↓

303) El-En: des atomes

304) Ens: non le sucre

305) El? : le glucose

306) Ens : d'accord↓ le glucose j'lai dit avant

307) El-Sh: ah mais j'ai pas entendu

308) Ens: j'vous ai dit qu'il s'agissait d'une combustion donc heu ce sucre plus

309) El-Sh:  $CO_2$

310) El? :  $CO_2$

312) El? : est égale co2

313) Ens : produit alors co2

314) El-En : h2o

315) Ens : plus h2o, j'vous l'dis / d'accord

316) El-En : oui mais il manque encore des trucs là

317) Ens : 6 6 (ajoute les coefficients stœchiométriques)

318) El-Sh : c'est pas 6 monsieur c'est 3

319) El? : non c'est 6

320) Ens : oui mais je l'équilibre y'a 12 12 C 6 C 12 h 12 18 18 6

321) El-En : faut écrire ça↑

322) Ens : non alors

323) El? : faut écrire↑

324) Ens : non alors

325) El-En : si ça fait déjà 18 sans le 6

326) Ens : bon pas grave pas grave pas grave en l'occurrence ça c'est c'qui s'passe dans votre organisme c'est à dire que vous cette réaction-là c'est une combustion donc elle produit quoi↑ c'est ça qui m'intéresse elle produit de l'énergie / d'accord↑

327) El 14 : est-ce que ça veut dire qu'elle produit de la chaleur↑

328) Ens : de la chaleur si tu veux de l'énergie maintenant j'vous repose la question/ pour quelle raison est-ce que vous respirez

329) El14 : pour produire de l'énergie

330) Ens : c'est à dire pour brûler quoi↑

331) Els : des calories

332) Ens : non pas / (montre la formule du glucose) ça c'est pas de la graisse pour produire↑ vos sucres vous voyez l'idée ou pas

333) Els : ouais

334) Ens : donc effectivement

335) El-En : brûler le sucre↑

336) Ens : pour brûler le sucre

337) El-Sh : on respire pour brûler quelque chose

338) Ens : non les calories c'est non ça c'est autre chose c'est un raccourcis quand on dit brûler des calories d'accord↑ c'est une unité d'énergie les calories ok↑

339) El-En : unité d'énergie↑

340) Ens : oui pas grave pas grave El-En d'accord si vous respirez c'est pour justement que cet oxygène vous permette de brûler votre sucre c'est à dire vous amenez de l'énergie vous me suivez ou pas↑

341) Els : ouais

342) Ens : ouais, mmh bon je vais vite

Extrait 22: « respiration et pain au chocolat » Nino — phase 2 — séance 3 [54 : 10 à 59 : 00]

Au début de l'extrait, le milieu symbolique est composé du cycle du carbone holocène projeté au tableau sur lequel l'enseignant a reporté les équations de réaction de combustions du carbone, du méthane et du

butane qui viennent d'être étudiées. Nino commence en posture de surplomb pour définir la tâche attendue : modéliser la flèche verte symbolisant la respiration animale comme une réaction de combustion. Pour cela, il fait référence à la définition de la combustion introduite au cours des séances précédentes : « un combustible plus de l'oxygène ». Il interprète le phénomène de la respiration au niveau de la réalité idéalisée en évoquant la combustion « du glucose » ou « du sucre », dont il inscrit la formule chimique au tableau. Il confie ensuite aux élèves la responsabilité d'identifier la formule du deuxième réactif de cette transformation chimique, dont il vient de citer le nom vernaculaire : l'oxygène. Un élève hors champ de la caméra se saisit de cette responsabilité en citant la formule et fait avancer le temps didactique. L'enseignant se place alors en posture d'accompagnement pour dévoluer aux élèves la responsabilité de mettre en relation le modèle de la respiration animale et celui de la combustion du glucose. Pour cela, il introduit dans le milieu l'origine du glucose, l'alimentation, en faisant l'analogie entre le combustible et un pain au chocolat. À ce moment de l'extrait, Nino confronte dans son discours concepts quotidiens et concepts scientifiques : « votre combustible c'est votre petit pain au chocolat comment vous faites pour ajouter  $O_2$  ». De plus, le registre dans lequel doit se placer la réponse attendue est implicite, nous manquons d'indices dans le discours pour l'anticiper, et nous supposons qu'il en est de même pour les élèves dans cette situation. Aussi, surviennent une succession de traits non pertinents de la part des élèves qui ralentissent le temps didactique. El-En commence par proposer de souffler dans le pain au chocolat. Cette réponse non pertinente traduit non seulement la recherche des limites du contrat didactique par cet élève, mais semble aussi pouvoir être interprétée du point de vue de la biologie comme une mauvaise compréhension du phénomène de respiration, phénomène au cours duquel, rappelons-le, du dioxygène est consommé et du dioxyde de carbone produit. Peut-être est-elle l'expression d'une analogie aux situations de la vie quotidienne où souffler sur un combustible incandescent favorise la combustion ? Nino invalide cette réponse, ce qui conduit El-En à faire une nouvelle proposition, pertinente cette fois-ci, puisqu'elle introduit dans le milieu l'idée de l'origine alimentaire du glucose : « on le mange ». Ce trait pertinent pourrait accélérer le temps didactique, mais l'enseignant ne s'appuie pas dessus et reformule aux élèves la responsabilité d'identifier le rôle de la respiration. Cette nouvelle formulation n'apporte pas plus d'indices quant aux attentes de Nino vis-à-vis de la mise en relation des modèles biologique et chimique. C'est pourquoi les élèves produisent un ensemble de réponses dans le registre de la biologie : « faire fonctionner les poumons », « alimenter le cerveau/le sang », « avoir de l'oxygène », « faire bouger les muscles », provoquant un nouveau ralentissement. Nino adopte alors une posture de surplomb et pointe la formule de la molécule de glucose écrite sur le cycle du carbone en confiant aux élèves l'identification de l'espèce chimique qu'elle représente. Cette régulation permet de deviner que la réponse attendue se situe dans le registre de la chimie. El-Sh produit alors un trait pertinent du point de vue de la chimie, mais en rupture avec le contrat : « une formule chimique ». Il semblerait que la question de Nino « qu'est-ce que c'est » soit trop générique pour déterminer à quel niveau de savoir il faisait référence. Le temps didactique est alors ralenti, et la régulation qu'il va produire à destination de El-Sh pour l'accompagner vers la production d'un trait pertinent ne sera pas moins implicite : « qui représente ? ». C'est pourquoi El-En selon le même raisonnement que El-Sh répond « des atomes », trait non pertinent du point de vue des attentes de Nino. Ce dernier bascule alors en posture de surplomb pour accélérer le temps didactique en citant le sucre, puis le glucose. Il recentre les élèves vers l'enjeu de la tâche — modéliser la flèche du cycle du carbone à l'aide de l'équation de réaction de combustion du glucose — en confiant l'identification du deuxième réactif aux élèves. Le temps didactique avance légèrement, puis ralentit avec la production d'un trait

non pertinent par El-Sh : « CO<sub>2</sub> ». Nino se place alors en posture topogénétique haute et détermine lui-même la formule du dioxygène qu'il inscrit dans l'équation de sorte à faire avancer le temps didactique. Un élève hors champ produit un trait pertinent en identifiant le dioxyde de carbone comme produit de la réaction. Nous ne pouvons pas déterminer sur la base de cette intervention seule si la réponse de l'élève repose sur ses connaissances de biologie relatives à la respiration ou sur l'équation de réaction chimique à partir de laquelle le principe de conservation des atomes permet de prédire les produits de la réaction. En tout état de cause, Nino institue immédiatement ce trait pertinent en complétant l'équation de réaction au tableau. L'accélération du temps didactique se poursuit avec l'identification du deuxième produit de la réaction par El-En, l'eau, instituée par l'enseignant. Cet élève pointe ensuite le manque des coefficients stœchiométriques dans l'équation. Nino accélère le temps didactique en équilibrant rapidement l'équation en posture de surplomb. Puis il prend la responsabilité de mettre en relation le modèle de la combustion et la fonction biologique de la respiration qu'il désigne comme orientée vers la production d'énergie. Son discours se place alors dans le registre de la biologie. Il dévolue à nouveau l'interprétation de la respiration animale dans le registre de la chimie aux élèves. Tout d'abord, E114 se saisit de cette responsabilité pour produire un trait non pertinent : « produire de l'énergie » (réponse qui est toutefois pertinente dans le registre de la biologie que l'enseignant vient de mobiliser). Nino se place alors en posture d'accompagnement pour réorienter cette réponse vers le registre de la chimie. Il utilise pour cela le verbe « brûler » au niveau de la réalité perçue. Plusieurs élèves produisent alors un trait non pertinent, car sans lien avec les savoirs en jeu dans cette séquence : « brûler des calories », ce qui ralentit encore le temps didactique. L'enseignant adopte alors une posture de surplomb pour gérer l'incertitude. Cependant, dans ce moment de régulation, il se trompe de formulation et identifie la respiration comme une réaction produisant du sucre. El-En corrige cette erreur et accélère le temps didactique en indiquant que le sucre est brûlé. El-Sh manifeste alors son incertitude vis-à-vis de la reformulation de El-En, qu'elle répète mot à mot. Nino quitte sa posture de retrait pour une posture de surplomb et conclut sur l'idée que la combustion du sucre dans l'oxygène fourni par la respiration permet de produire de l'énergie.

Avec cette conclusion, on s'est éloigné de la tâche formulée initialement qui consistait à modéliser les flèches du cycle du carbone impliquant le dioxygène. En effet, au cours de cet extrait l'étude des produits de la réaction de combustion du glucose est délaissée au profit d'une perspective plus biologique et anthropocentrée, orientée vers l'identification de l'énergie produite par la respiration.

**Pour résumer, l'analyse de cet extrait montre un enjeu initial assez clair : modéliser la flèche du cycle du carbone représentant la respiration animale comme une réaction de combustion. Si le motif d'une telle modélisation usuellement mis en œuvre par Nino est visible dans cet extrait — identification des réactifs et des produits au niveau de la réalité idéalisée, modélisation microscopique par l'identification des molécules composant les espèces chimiques, écriture et équilibre de l'équation de réaction —, nous observons également l'interférence d'interprétations issues du domaine de la biologie qui brouillent l'enjeu initialement énoncé. En effet, Nino dévolue aux élèves la responsabilité d'identifier l'origine du glucose qui intervient dans la respiration (l'alimentation), alors considéré comme réactif de la réaction de combustion étudiée. Ce glissement dans le registre de la biologie provoque des failles dans la structuration du milieu. De même, au moment de conclure, l'enseignant évoque le rôle de la respiration dans la production d'énergie, essentielle au fonctionnement des organismes. Cette interprétation de la respiration,**

**pertinente d'un point de vue biologique, entre en conflit avec le modèle de la combustion qui est initialement convoqué dans le milieu pour interpréter la flèche du cycle du carbone.**

**De plus, dans ce milieu mal structuré, les élèves sont peu responsables de la co-construction du savoir. Les rares occasions de dévolution ne leur permettent pas de faire avancer la chronogenèse d'une part parce que le domaine où se situent les attentes de l'enseignant est mal défini, d'autre part parce que le milieu ne présente pas les savoirs nécessaires pour répondre à ces attentes.**

*10.2.2.2.2 Présentation de l'extrait « la photosynthèse » et éléments d'analyse de la relation contrat didactique-milieu*

L'extrait « la photosynthèse » (Extrait 23) suit l'extrait « respiration et pain au chocolat » (Extrait 22) dans le déroulement de la séance 3 et se situe dans l'intervalle de temps [00 :59 : 00 – 01 : 02 : 58]. Tous deux appartiennent à l'enjeu N55 et sont suivis de la phase de l'action N55c relative à l'étude codisciplinaire de l'anthropocène à partir des modèles du cycle du carbone et de la réaction chimique dont nous avons analysé un extrait significatif dans le chapitre 9 (extrait « réaction chimique et anthropocène »).

344) Ens : (*affiche document sur la photosynthèse au niveau de la feuille des végétaux*) alors c'est c'qui s'passe / c'est c'qui s'passe au niveau des végétaux c'est c'qui s'passe chez vous aussi↓ d'accord vous récupérez de l'oxygène du dioxygène d'accord vous le brûlez ça produit du gaz carbonique et de l'eau et cette énergie en fait c'est c'qu'on appelle l'énergie chimique c'est c'qui vous permet de vous maintenir tel que vous êtes c'qui s'passe aussi chez les végétaux d'accord↑ et là vous avez l'équation d'accord c'est bon↑ non-équilibrée mais c'est pas grave c'est bon↑ maintenant de l'autre côté on finit là-dessus de l'autre côté qu'est-ce qui s'passe (*zoome sur les arbres du cycle du carbone*) donc les végétaux eux aussi en fait respirent d'accord et de l'autre côté qu'est-ce qui s'passe

345) El14 : ben ils récupèrent ce co2

346) Ens : ouais sous quel phénomène y'a un nom vous êtes censés le connaître

347) El-En : ah la je sais plus comment ça s'appelle

348) El? : l'absorption

349) Ens : El-Cl↑

350) El? : la vaporisation

351) Ens : je t'écoute alors

352) El-Ya : la photosynthèse

353) El-En : oui

354) El-Ya : la photosynthèse dis

355) Ens : El-Cl↑ quel est le nom du phénomène

356) El-Cl : c'est pas la photosynthèse

357) Ens : El-Cl

358) El-Cl : non mais je sais pas hein //

359) Ens : ça vous aiderait un petit peu si j'vous disais que la semaine prochaine je vous fais une récit là-dessus↑

360) Els : non

361) Ens : (remarque discipline) la photosynthèse, la photosynthèse qu'est-ce qu'elle fait cette photosynthèse;

362) El-En : ben elle colore les

363) El-Sh : elle produit du sucre

363) Ens : elle produit du sucre;

365) El-En : oui c'est ça genre en mode c'est

366) Ens : je vais pas l'équilibrer (écrit l'équation de la réaction de photosynthèse sur le cycle)

367) El-En : pourquoi;

368) Ens : elle produit quoi d'autre;

369) El-En : de l'h<sub>2</sub>o du co<sub>2</sub>

370) Ens : non elle produit pas d'h<sub>2</sub>o

371) El-En : du o<sub>2</sub>

372) Ens : et on est tout content nous qu'elle produise de l'o<sub>2</sub>

373) El14 : ben oui forcément

374) Ens : parce que pourquoi on est tout content qu'elle produise de l'o<sub>2</sub>;

375) Els : parce qu'on respire de l'o<sub>2</sub>

376) Ens : parce que sinon nous on n'a pas d'o<sub>2</sub> qu'est-ce qui s'passe ici si y'a pas de o<sub>2</sub>

377) El-En : on respire pas

378) Ens : y'a plus de transformation et puis on;

379) Els : meurt

380) Ens : parce qu'on n'a plus d'énergie voilà si vous voulez d'accord

381) El? : mais l'énergie ne meurt pas l'énergie ça se transforme

382) El14 : oui mais pas nous

383) Ens : oui oui c'est vrai c'est vrai elle le fait à partir de quoi pour faire ça c<sub>6</sub>h<sub>12</sub>o<sub>6</sub> plus o<sub>2</sub> elle utilise quoi la plante

384) El-En : le soleil

385) Ens : le soleil, ok le soleil c'est sa façon de récupérer de faire cette transformation mais ici y'a quoi au départ;

386) El14 : ben y'a du co<sub>2</sub> aussi

387) Ens : du co<sub>2</sub>;

388) El-En : et ils vont manger le

389) Ens : et puis quoi d'autre;

390) El? : l'eau

391) Ens : merci /

392) El-En : et ben voilà

393) Ens : donc vous avez ici exactement la réaction inverse ça va vous me suivez ou pas;

394) Els : ouais

395) Ens : ok;

396) El-En : et heu la nuit ils ils rejettent le co<sub>2</sub>

397) Ens: alors c'qui s'passe c'est que heureusement les plantes elles sont quand elles produisent du quand elles produisent heu quand elles font cette réaction de photosynthèse (pointe l'équation au tableau) elles sont hum elles sont elles produisent en plus d'accord les plantes consomment de l'oxygène mais en fait si on regarde la balance elles en produisent davantage qu'elles n'en consomment, heureusement pour nous / d'accord, si on fait un peu d'anthropomorphisme d'accord,

Extrait 23: « la photosynthèse » chez Nino (phase 2 — séance 2) [00 :59 : 00 à 01 : 02 : 58 ]

Au début de l'extrait, Nino, en posture de surplomb, revient sur le cycle du carbone holocène projeté au tableau (milieu symbolique) pour pointer la flèche correspondant à la respiration végétale et faire le parallèle avec la respiration animale dont l'équation de réaction vient d'être rédigée au tableau. Pour interpréter la respiration végétale comme une réaction chimique, l'enseignant projette une illustration issue des Moyens d'enseignement romands (MER) de biologie qui reprend les symboles de l'équation chimique au niveau d'une feuille ainsi que l'équation bilan de la réaction (Figure 121).

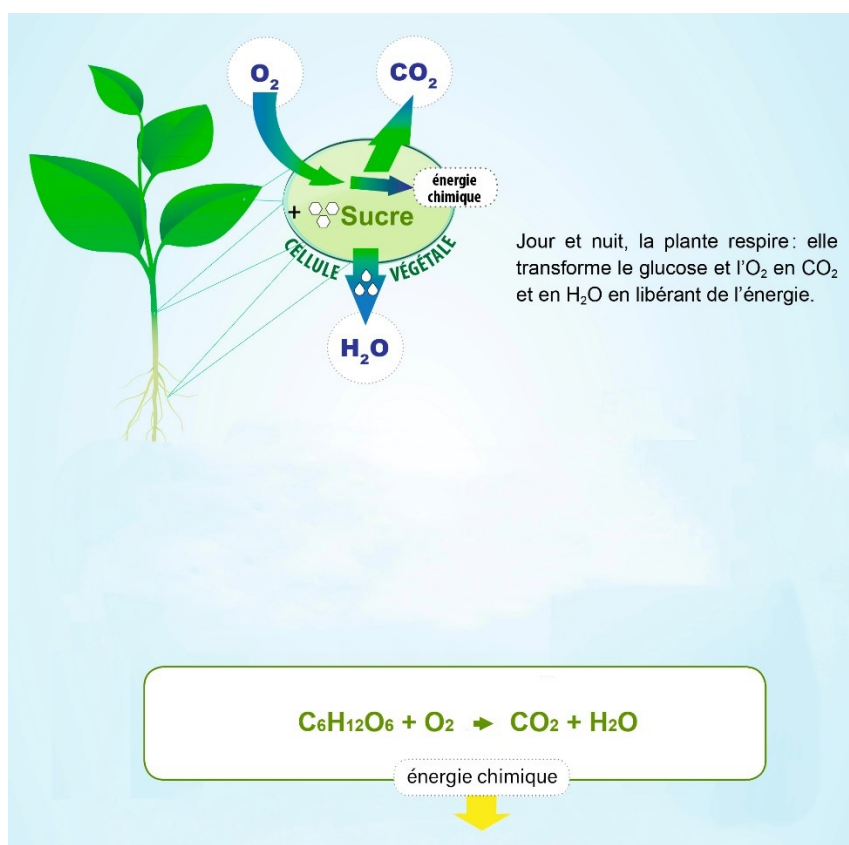


Figure 121 : extrait des MER MSN38 (biologie) (CIIP, 2010e)

En effet, du point de vue de la biologie, la respiration est un phénomène qui recouvre un ensemble de processus métaboliques ayant lieu dans différents compartiments cellulaires et dont la fonction physiologique est la production d'énergie sous forme d'adénosine triphosphate (ATP). Ce phénomène consomme du dioxygène et produit du dioxyde de carbone. Il consiste en un enchaînement de réactions chimiques complexes impliquant notamment des mécanismes d'oxydoréduction. Dans le cadre de la biologie scolaire, il n'est pas rare d'écrire le bilan de cet ensemble de réactions sous la forme d'une équation du type :  $O_2 + \text{sucres} \rightarrow CO_2 + H_2O + \text{énergie}$ . Ce type de représentation emprunte le formalisme

de l'équation de réaction chimique, et mélange les formules de molécules spécifiques à la chimie, les dénominations courantes de familles de substances et un bilan énergétique. Dans ce cas, l'équation n'a pas pour fonction de représenter le réarrangement des atomes au cours de la réaction chimique, mais sert de bilan, pour résumer un ensemble de phénomènes complexes. Au niveau du secondaire I et dans la perspective d'étudier la place de la respiration animale dans le cycle carbone, une étude du bilan des substances consommées et produites suffit. L'analyse en termes de bilan énergétique de la respiration peut donc être négligée.

Nino s'appuie sur le bilan de la respiration végétale pour faire le lien avec le phénomène de photosynthèse représenté sur le cycle du carbone par une flèche entre les compartiments atmosphère et biosphère. C'est un phénomène qui est étudié dans le cadre du cours de biologie de 10<sup>e</sup> année, il confie donc la responsabilité de son identification aux élèves. El14 commence par occuper cette responsabilité en produisant un trait pertinent au niveau du cycle du carbone : « ils récupèrent le CO<sub>2</sub> ». Nino qui cherche à introduire le nom du phénomène dans le milieu se place en posture d'accompagnement et précise ses attentes. Dans un premier temps, les élèves ne semblent pas se souvenir du phénomène étudié en biologie, ou peut-être que le lien avec les enseignements de biologie n'est pas suffisamment explicite. Aussi, ils commencent par produire un ensemble de traits non pertinents qui ralentissent le temps didactique : « je ne sais plus », « l'absorption », « la vaporisation ». L'intervention de El-Ya qui finit par citer la photosynthèse accélère la progression du savoir, mais l'enseignant n'institue pas ce trait pertinent tout de suite au profit de la gestion de la discipline, ce qui conduit à un moment de stagnation du temps didactique.

Pour faire progresser l'avancée du savoir, Nino se place ensuite en posture de surplomb et institue la réponse de El-Ya, reprise par El-Cl, puis il confie aux élèves la responsabilité de rappeler la fonction biologique de la photosynthèse. El-En produit un trait non pertinent en citant la coloration des végétaux. En effet, la fonction physiologique de la photosynthèse est la production de matières végétales (notamment sous forme de sucres), alors que la coloration est un effet secondaire dû à l'implication de la chlorophylle dans les cellules sièges du phénomène. Le temps didactique ralentit temporairement, puis accélère avec la mention de la production de sucres apportée dans le milieu par El-Sh.

L'enseignant adopte alors une posture de surplomb pour instituer ce trait pertinent et interpréter le phénomène dans le registre de la chimie en rédigeant l'équation de réaction au tableau qu'il choisit explicitement de ne pas équilibrer. Pour cela, il modélise le sucre par la formule chimique du glucose, interprétant au niveau microscopique du modèle le niveau de réalité idéalisée. Sans produire de discours sur cette étape, il confie la responsabilité d'identifier le deuxième produit de la réaction aux élèves.

Pour occuper cette responsabilité, les élèves ne peuvent s'appuyer que sur leurs connaissances du phénomène biologique étudié au cours de l'année précédente, ce qui mobilise le niveau de la réalité idéalisée. La navigation entre les différents niveaux du modèle de la chimie est alors implicite. El-En saisit cette responsabilité en jouant avec un effet de contrat qui voudrait que la substance demandée par Nino soit forcément déjà rencontrée dans le cadre de la séquence de chimie. Il produit alors deux traits non pertinents qui ralentissent le temps didactique : « H<sub>2</sub>O », « CO<sub>2</sub> ». Nino, en posture de surplomb régule cette réponse, ce qui permet à El-En de citer la formule chimique du dioxygène et de faire progresser le temps didactique. Nino institue cette réponse en l'identifiant comme quelque chose de positif pour l'espèce humaine. Il impose une vision anthropocentrée du cycle du carbone et dévolue aux élèves la mise en relation de la photosynthèse et de la respiration animale. À ce moment de l'extrait, son

discours se situe plutôt au niveau du modèle macroscopique. Plusieurs élèves occupent cette responsabilité en soulignant que la respiration consomme du dioxygène. La progression du savoir stagne.

L'enseignant poursuit en posture de surplomb pour confirmer la dépendance des phénomènes de respiration animale et de photosynthèse dans le cycle du carbone. Pour cela, il évoque un scénario où le dioxygène serait absent de l'atmosphère, ce qui empêcherait la réaction de respiration d'avoir lieu et rendrait donc la production d'ATP impossible, conduisant à la mort des animaux. Puis il réoriente les élèves vers la modélisation de la photosynthèse en confiant aux élèves la responsabilité d'identifier les réactifs à l'origine de la réaction chimique. Cependant, la formulation de sa question « elle utilise quoi la plante » ne donne pas suffisamment d'indices aux élèves à propos du registre dans lequel la réponse est attendue (la chimie). El-En produit alors un trait pertinent dans le registre de la chimie, mais hors contrat à ce moment de l'extrait : « le soleil ». Cette réponse est peut-être orientée par le type de représentation de la photosynthèse étudié dans le cadre du cours de biologie, qui fait intervenir dans l'explication du phénomène l'énergie lumineuse au même titre que les substances réactives (Figure 122).

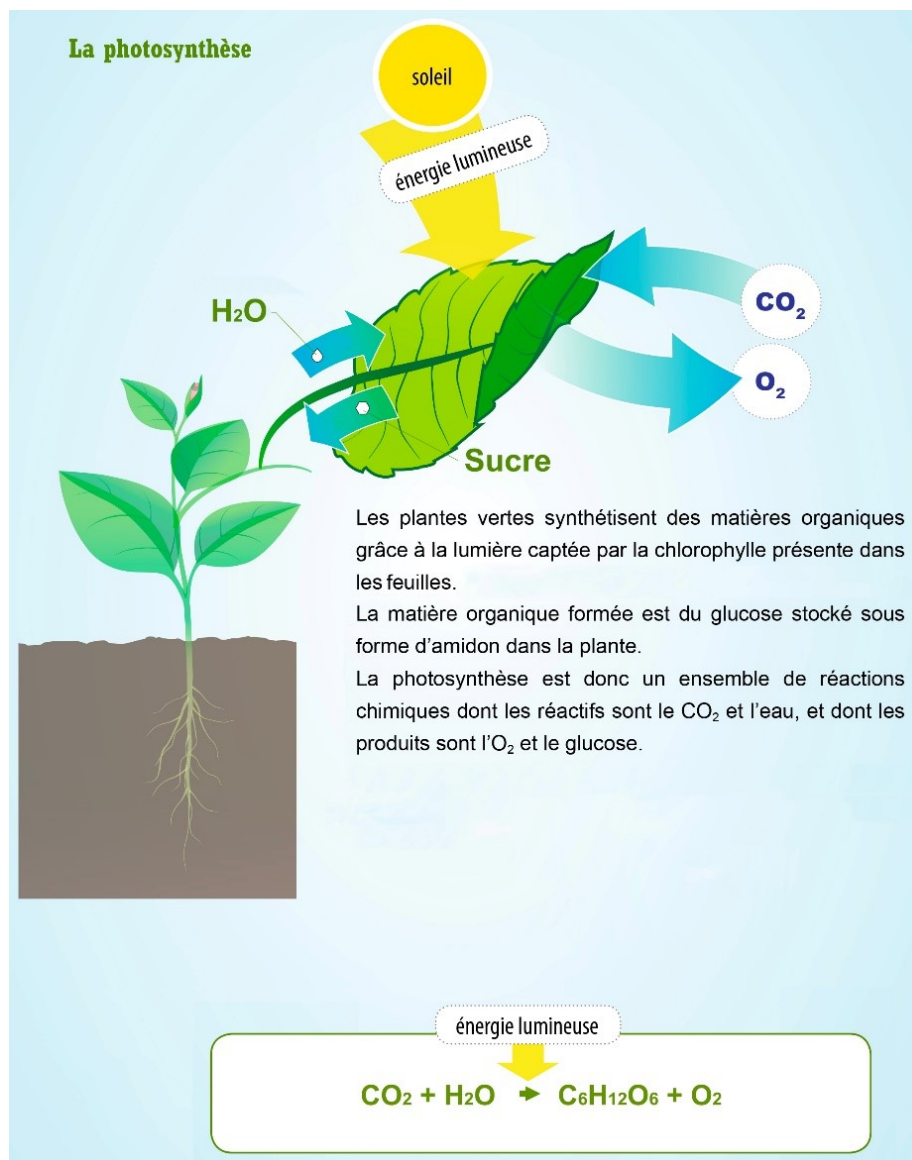


Figure 122 : extrait des MER MSN38 (CIIP, 2010e)

Nino gère l'incertitude en précisant ses attentes vis-à-vis de cette tâche d'identification : « y'a quoi au départ ». El14 accélère le temps didactique en identifiant le CO<sub>2</sub> et l'eau, traits pertinents immédiatement institués par l'enseignant qui occupe une posture topogénétique haute pour conclure à propos de l'équation de réaction qu'il s'agit « exactement de la réaction inverse » de la respiration. El-En tente alors d'introduire la respiration végétale dans le milieu en mentionnant la production nocturne de dioxyde de carbone par les végétaux. Nino prend en compte cette intervention en conservant une posture de surplomb de sorte à garder la maîtrise sur la gestion du milieu et sur le temps didactique. Il nuance l'idée de compensation de la photosynthèse par la respiration végétale en relativisant la quantité de dioxyde de carbone produite vis-à-vis de la quantité consommée. Une fois de plus, il conclut en mobilisant une vision anthropocentrée du phénomène : « heureusement pour nous ».

**Pour résumer, contrairement à l'extrait « respiration et pain au chocolat », l'analyse de l'extrait « la photosynthèse » met en évidence le recours de Nino au modèle biologique (macroscopique) pour interpréter le phénomène au niveau du modèle microscopique de la chimie. En effet, l'enseignant propose dès le début de l'extrait de comparer la respiration et la photosynthèse, probablement pour faire appel aux connaissances des élèves de ces deux phénomènes étudiés dans le cadre des enseignements de biologie. Ainsi, le rappel du fonctionnement de la photosynthèse permet à quelques élèves d'identifier les espèces chimiques impliquées dans ce phénomène, point d'appui pour l'écriture de l'équation de la réaction chimique par Nino. Nous observons cependant des moments de flou où les attentes de l'enseignant ne sont pas clairement définies, entre modèle de la biologie et modèle de la chimie, ce qui perturbe les prises de responsabilité des élèves dans la co-construction du savoir.**

**De plus, au moment de conclure, Nino glisse de nouveau dans une lecture biologique et anthropocentrée du cycle du carbone en interprétant la photosynthèse comme un phénomène orienté vers la production du dioxygène indispensable à la survie de l'espèce humaine.**

#### *10.2.2.2.3 Interprétations*

Dans ces deux extraits significatifs consécutifs, la tâche initialement annoncée est la modélisation de certaines flèches du cycle du carbone comme des réactions chimiques (indicateur de codisciplinarité I1). Aussi des objets de savoir relevant de la chimie et de la biologie sont mobilisés en alternance et mis en relation à certains moments de ces extraits (indicateurs de codisciplinarité I2 et I4). Les conditions préalables d'introduction d'un problème complexe (CP1) et de diversité des matrices disciplinaires (CP2) sont satisfaites lors de l'introduction du cycle du carbone au début de cette séance (enjeu N52).

Cependant, au cours des extraits « respiration et pain au chocolat » et « la photosynthèse », la mise en relation des différents modèles disciplinaires est parfois confiée aux élèves, sans que le milieu soit suffisamment défini pour que celles et ceux-ci puissent identifier la matrice disciplinaire dans laquelle produire les réponses attendues. Dans le cas du pain au chocolat en particulier, la désignation de cet aliment comme source du combustible de la réaction de respiration juxtapose le modèle biologique de la respiration qui considère une équation « bilan » rendant compte d'un ensemble de réactions d'oxydoréduction (cf. Figure 121) et le modèle de la réaction chimique enseigné au secondaire I, pour lequel l'équation de réaction représente un réarrangement d'atomes. De plus, dans la question adressée aux élèves, les différents niveaux du modèle de la chimie sont mobilisés tour à tour sans explicitation (réalité perçue, réalité idéalisée puis niveau du modèle). Ainsi, face aux incertitudes des élèves, Nino finit le plus souvent par adopter une posture topogénétique haute afin de s'assurer de la progression du

temps didactique<sup>96</sup>. La responsabilité des élèves se résume alors à identifier les espèces chimiques impliquées dans les phénomènes biologiques mis à l'étude, à partir de leurs connaissances issues du cours de biologie de 10<sup>e</sup> année. Du point de vue du modèle de la chimie, les élèves interprètent uniquement le cycle du carbone au niveau de la réalité idéalisée, c'est l'enseignant qui a la main sur la rédaction de l'équation de réaction et parfois même sur la modélisation des substances identifiées par les élèves (notamment le cas du sucre modélisé comme du glucose à l'aide de la formule chimique pour l'étude de la photosynthèse). Ainsi, si la codisciplinarité est présente dans ces extraits, elle est majoritairement à la main de l'enseignant.

De plus, la réflexion sur le problème environnemental introduit au cours de l'enjeu N52 — l'origine anthropique du dioxyde de carbone atmosphérique — disparaît au fil de ces deux extraits. En effet, le raisonnement de Nino semble plutôt se porter sur une interprétation biologique des phénomènes étudiés : la production d'énergie ou de matière organique par les êtres vivants concernés. La mise en relation des modèles disciplinaires progressivement élaborés au cours de l'extrait s'effondre au moment de la conclusion, centrée sur la fonction biologique du phénomène étudié (la production d'énergie pour la respiration et la production de dioxygène pour la photosynthèse, ce qui relève plutôt d'une interprétation anthropocentrée du phénomène). Rappelons que Nino a une formation bidisciplinaire en biologie et en physique, dont la discipline principale est la biologie. Aussi, il a plus souvent l'occasion d'enseigner les phénomènes de respiration et de photosynthèse sous le prisme de la biologie en 10<sup>e</sup> année et l'approche complexe des phénomènes, induite par le cycle du carbone est nouvelle pour lui.

Le glissement dans le registre de la biologie en conclusion de ces deux extraits pourrait donc être expliqué à la lumière de l'épistémologie professionnelle de Nino (au sens de Ligozat, 2011) (cf. 5.6.2), colorée par sa formation initiale et ses dix-huit années d'expérience d'enseignement.

Cette hypothèse peut également permettre d'interpréter la conclusion de Nino à propos des solutions possibles pour agir sur le déséquilibre du cycle du carbone, au terme de la phase de l'action N55c. Après une réflexion portée par la mise en relation des modèles du cycle du carbone et de la réaction chimique (cf. 9.2.1.2), Nino revient à l'argument de l'énergie pour faire un parallèle entre l'énergie nécessaire à la survie des animaux et l'énergie impliquée dans les modes de production des sociétés capitalistes (Extrait 24).

409) Ens: l'idée comme pour votre organisme c'est ce besoin tu l'as dit E1? c'est ce besoin d'énergie, si on n'a pas d'énergie on n'est pas bien, si vous n'avez pas d'énergie vous n'êtes pas bien, d'accord jusqu'à la mort ok, donc on dépend de notre de notre énergie en fait l'idée ce serait de produire de l'énergie sans toucher à ce cycle-là ou en limitant cet apport-là vous voyez l'idée ou pas y'a d'autres façons de produire de l'énergie / ok

*Extrait 24: « produire de l'énergie » chez Nino (phase 2 — séance 3) [01 : 04 : 07 à 01 : 04 : 43]*

Cette comparaison met sur un même plan des phénomènes biochimiques qui n'ont pas exactement la même fonction. Les premiers, communs à toutes les sociétés humaines, sont indispensables à la survie des individus et ont finalement peu de conséquences sur l'accumulation du dioxyde de carbone

---

<sup>96</sup> Rappelons que ces extraits interviennent dans le dernier tiers de la dernière séance de l'unique séquence de chimie de 11<sup>e</sup> année.

atmosphérique. Les seconds, en revanche, sont guidés par des décisions politiques orientées vers l'augmentation des richesses des sociétés industrielles (au sens de Lévi-Strauss, 2011) et ont un lien direct avec l'augmentation de l'effet de serre. Or le discours de Nino utilise la vision moniste du rapport de l'espèce humaine à la nature (cf. 4.3.1.1). En considérant « la production d'énergie » en général, il occulte les dimensions politico-économiques qui entrent en jeu dans l'élaboration du problème complexe et réduit le raisonnement à ses dimensions biologiques. La codisciplinarité amorcée par l'étude des réactions chimiques en jeu dans le cycle du carbone perd en épaisseur au moment de la conclusion.

L'étude du rapport au savoir « cycle du carbone » de cet enseignant apporte des éléments complémentaires à ces résultats.

#### *10.2.2.2.4 Étude du rapport au savoir de l'enseignant*

Dans le chapitre 9, nous avons montré que Nino considère l'équilibre de l'équation de réaction chimique comme une tâche révélatrice de la réussite des élèves dans la discipline scolaire « chimie », mais aussi que l'enseignant attend des élèves qu'elles et ils soient capables de mobiliser cette équation pour interpréter un phénomène expérimental (fonction de modélisation) (cf. 9.2.2.2.4).

Aussi, les entretiens *ante*-observations réalisés avec Nino avant la mise en œuvre de la séquence intégrant le cycle du carbone (phase 2) montrent plutôt la fonction de contextualisation des concepts de la chimie accordée à cet objet complexe. Quelques éléments du discours de Nino font apparaître un enjeu d'enseignement-apprentissage secondaire lié au cycle du carbone : la sensibilisation des élèves aux problèmes environnementaux. Ce deuxième enjeu apparaît dans la mise en œuvre de la séquence, au moins au niveau des intentions de l'enseignant, car l'analyse des extraits significatifs que nous venons de réaliser nuance les résultats sur l'élaboration du problème complexe, au profit des savoirs disciplinaires. L'étude de la configuration didactique reconstruite à partir de ces deux extraits ajoute des éléments de discussion de ces résultats.

#### *10.2.2.2.5 Discussion des configurations didactiques*

Dans les extraits « respiration et pain au chocolat » et « la photosynthèse » les savoirs sont pluriels, car relevant de différents modèles (Simonneaux, 2011, p. 91). La posture épistémologique de Nino, orienté vers la mise en relation des fonctions biologiques de la respiration animale et de la photosynthèse, et des effets pour la viabilité terrestre des espèces animales est plutôt scientifique. Enfin, la stratégie didactique développée en regard, qui implique les élèves dans la construction du problème, est qualifiée de « problématique » selon les catégories déterminées par Simonneaux (2011, p. 144). Ces trois dimensions articulées définissent une configuration problématisante (Simonneaux, 2011, p. 149) (Figure 123).

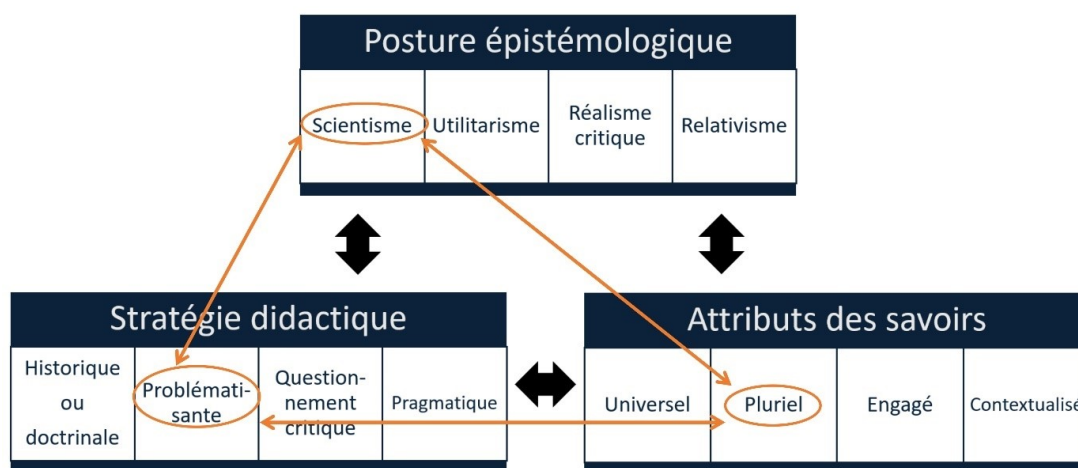


Figure 123 : reconstruction de la configuration didactique à partir des extraits « respiration et pain au chocolat » et « la photosynthèse »

En relation avec l'extrait « réaction chimique et anthropocène », relevant également d'une configuration problématisante, mais dans le cadre de laquelle la posture épistémologique de Nino est plutôt réaliste critique, ces trois extraits significatifs de la séance 3 pourraient contribuer à la construction du problème environnemental mis à l'étude — l'origine anthropique du dioxyde de carbone atmosphérique — et apporter les concepts disciplinaires utiles pour élaborer des solutions.

Dans les faits, Nino confie peu de responsabilités aux élèves au moment de la construction du problème, bien que nous repérons dans l'extrait un mode de communication « interactif » (Simonneaux, 2011, p. 144). Le plus souvent, les tâches confiées aux élèves sont de faible niveau conceptuel, et font surtout appel à la mémoire didactique du cours de biologie (par exemple, identifier les produits d'un phénomène) ou de différents aspects du langage de la chimie (mettre en correspondance nom et formule chimique d'une substance, se souvenir des symboles chimiques associés à un atome, etc.). Les élèves ne participent donc pas directement à l'élaboration du problème complexe. Aussi, bien que les savoirs soient pluriels, nous pourrions voir à la fin de ces extraits une forme de configuration hiérarchique (Simonneaux, 2011, p. 149), dans la mesure où Nino oriente la situation vers une interprétation biologique des phénomènes présentés dans le cycle du carbone.

#### 10.2.2.2.6 Du côté des élèves

Les entretiens post-observations réalisés chez Nino à l'issue de la phase 2 concernent deux élèves. E11 est une élève plutôt faible du point de vue de ses résultats en physique-chimie, néanmoins elle participe souvent pendant les séances de cours. E12 est un élève aux résultats « moyens » en physique-chimie, plutôt discret pendant les leçons. Nonobstant leurs niveaux nuancés, ces deux élèves évoquent le modèle de la réaction chimique et le principe de conservation des atomes avec précisions lorsque nous les interrogeons sur les contenus de la séquence. Cependant, il n'est jamais question du cycle du carbone dans leurs souvenirs de la séquence, alors même que les entretiens ont lieu le jour de la séance 3, immédiatement après la conclusion à propos de l'anthropocène. En effet, les entretiens sont menés dans des conditions un peu particulières pour cette classe. Le temps accordé par Nino est très court et les entretiens sont réalisés dans un laboratoire attenant à la salle de classe, en parallèle d'une activité expérimentale démontrée au reste du groupe. C'est pourquoi nous n'avons pas eu le temps de soumettre à ces élèves les trois situations qui guidaient habituellement les entretiens (cf. Figure 114). Peut-être que

la représentation du cycle du carbone leur aurait permis de se remémorer des éléments relatifs au problème environnemental étudié avec Nino quelques instants auparavant ? Toutefois, l'analyse à l'échelle micro des extraits « respiration et pain au chocolat » et « la photosynthèse » ont mis en évidence les manques dans la structuration du milieu conduisant les élèves à produire des traits non pertinents, stériles du point de vue de l'avancée du savoir (notamment E11 qui participe beaucoup au cours de ces extraits) et contraignant Nino à prendre la responsabilité de la gestion de la codisciplinarité (cf. 10.2.2.2). Sa posture de surplomb au moment de conclure à propos des conséquences des activités industrielles sur l'augmentation du dioxyde de carbone atmosphérique (cf. 9.2.1.2) ne nous permet pas d'accéder à des traces de la compréhension des élèves de ce problème en fin de séquence. Et le contenu des entretiens post-observations menés dans les conditions particulières que nous venons de citer ne nous apporte pas davantage d'éléments d'interprétation pour cette classe.

#### *10.2.2.2.7 Schéma de la codisciplinarité chez Nino*

Les analyses aux échelles macro et méso, au niveau des synopsis, et micro, à travers l'analyse de la relation contrat didactique-milieu dans des extraits identifiés comme significatifs de l'action en situation, permettent de reconstruire la collaboration des matrices disciplinaires au service de l'étude d'un problème complexe dans la séquence conçue par Nino en phase 2 (Figure 124).

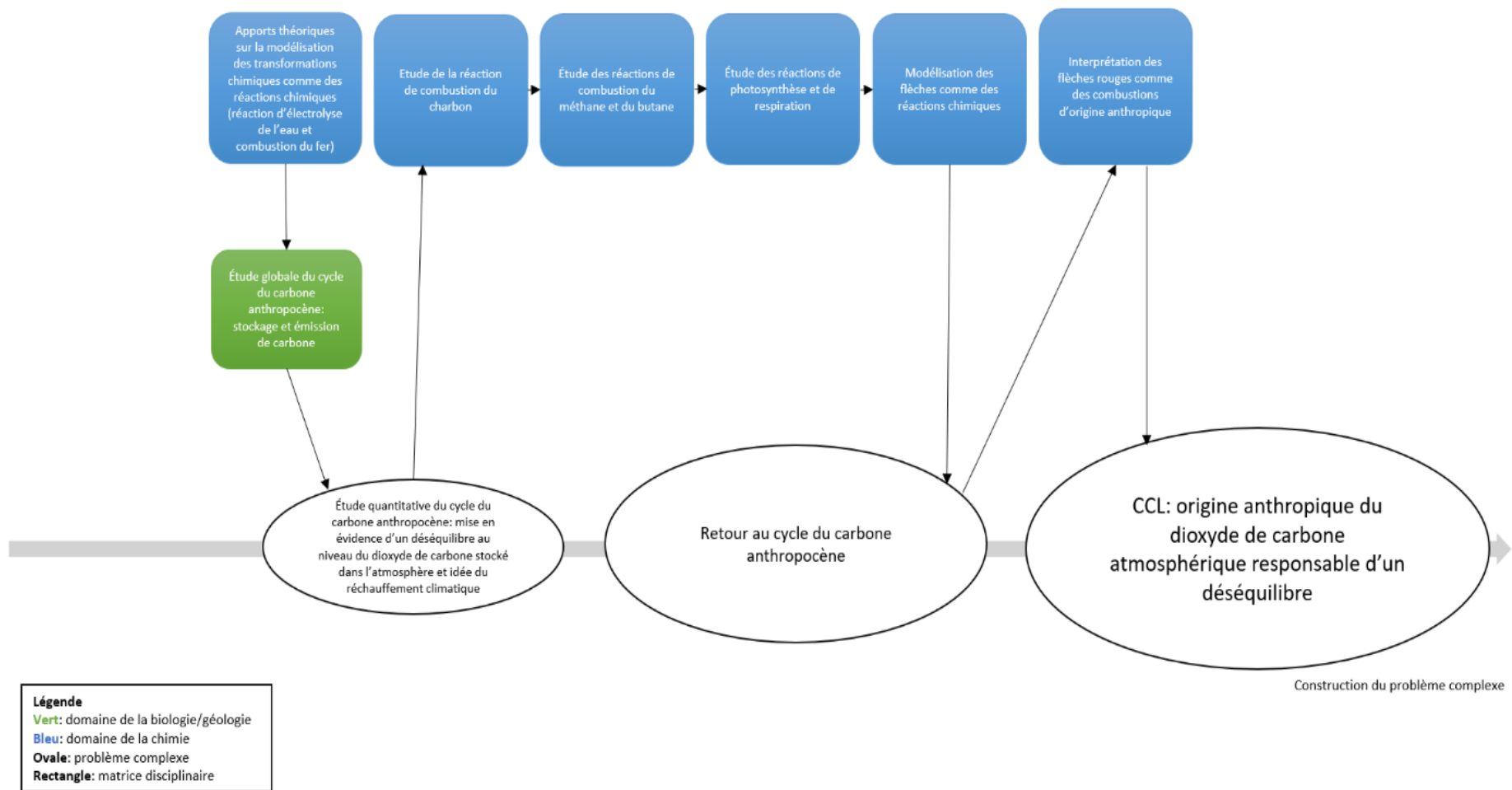


Figure 124 : schéma de la mise en œuvre de la codisciplinarité chez Nino (phase 2)

Du point de vue des critères de codisciplinarité établis dans la première section de ce chapitre (cf. 10.1), ce schéma met en avant le respect des conditions préalables de traitement d'un problème complexe (CP1) et de présence minimale de deux matrices disciplinaires (CP2). On observe également que la mise en relation de modèles disciplinaires distincts favorise l'élaboration du problème complexe (indicateurs de codisciplinarité I4 et I5) (Figure 125).

CP1: Traitement d'un problème complexe	CP2: Au moins deux matrices disciplinaires sont présentes	I1: Identifier le problème/la question/la tâche	I2: Les caractéristiques importantes des objets de savoir sont présentes dans le milieu	I3: Certains objets de savoir sont mis en tension dans le milieu	I4: Le phénomène est interprété à l'aide de différents modèles disciplinaires	I5: La mise en relation des modèles permet de répondre à la question/au problème initial
oui	oui	origine anthropique du dioxyde de carbone atmosphérique et idée du réchauffement climatique (séance 3)	combustions, photosynthèse, respiration, principe de conservation des atomes	énergie produite par la photosynthèse et la respiration, le pain au chocolat	Flèches du cycle du carbone interprétées comme des combustions (géré par Nino) (séance 3)	les combustions d'origine anthropique provoquent une accumulation du dioxyde de carbone dans l'atmosphère (géré par Nino) (séance 3)

Figure 125 : tableau récapitulatif des indicateurs de codisciplinarité reconstruits à partir de la séquence de Nino (phase 2)

Aussi, la prédominance de la matrice disciplinaire « chimie » (rectangles bleus) par rapport à la biologie/géologie (rectangles verts) montre qu'une partie de la séquence est consacrée exclusivement à l'enseignement-apprentissage du modèle de la réaction chimique, sans lien immédiat avec l'étude de la complexité. La codisciplinarité est renforcée à la fin de la séquence avec le retour au cycle du carbone et son interprétation à l'aide du modèle des combustions.

Dans les faits, le contrôle de l'enseignant sur la mésogenèse et la topogenèse ne permet pas toujours aux élèves d'être pleinement acteurs et actrices de la co-construction du milieu, en particulier de la mise en œuvre de la codisciplinarité qui contribue à l'élaboration du problème complexe. À cela s'ajoute un défaut de structuration du milieu concernant la définition des matrices disciplinaires en présence. Les élèves ne disposent pas des indices nécessaires pour répondre aux attentes de l'enseignant. De plus, si la conclusion produite par Nino est orientée vers la recherche de solutions quant au problème de l'accumulation du dioxyde de carbone atmosphérique (indicateur de codisciplinarité I5), nos analyses à l'échelle micro montrent un effacement de la codisciplinarité à la fin de l'extrait « réaction chimique et anthropocène », au profit d'un raisonnement ambigu centré sur la production d'énergie. La relation entre production de dioxyde de carbone atmosphérique et réchauffement climatique reste implicite. Nous pouvons donc nous interroger sur l'engagement des élèves dans la compréhension du problème complexe en jeu. L'étude du discours des élèves en entretiens post-observations ne nous apporte pas davantage d'indices pour répondre définitivement à cette question.

### 10.2.3 Henri et Aurélie : quand le sujet enseignant surplombe la situation

Nous allons maintenant étudier deux extraits significatifs chez Henri et Aurélie qui illustrent particulièrement des situations à potentiel codisciplinaire où le sujet enseignant accapare le contrôle de la mésogenèse sans permettre le partage des responsabilités.

### 10.2.3.1 Henri : un problème complexe implicite

#### 10.2.3.1.1 Présentation de l'extrait « cycle du carbone et conservation de la matière »

L'extrait qui nous intéresse intervient au cours de la séance 3 de la séquence d'Henri. Les séances 1 et 2 sont intégralement consacrées à l'introduction du modèle de la réaction chimique à travers l'étude de la réaction d'électrolyse de l'eau (Figure 126).

Enjeux de la séquence (N+1)	Enjeux N
Modélisation de la transformation chimique par la réaction chimique et étude des concepts associés (réactif, produit, principe de conservation)	Etude de la réaction d'électrolyse de l'eau : introduction des concepts d'atome, de molécule, d'équation de réaction chimique et du principe de conservation des atomes <b>N1</b> <i>Séances 1, 2 et 3</i> <i>[2h17min30]</i>
	Etude de la réaction de combustion du carbone : application des concepts introduits précédemment, lien avec le cycle du carbone et prévention de l'intoxication au monoxyde de carbone <b>N2</b> <i>Séance 3</i> <i>[41min30]</i>
	Préparation de l'évaluation <b>N3</b> <i>Séance 3</i> <i>[37min]</i>
	Etude des réactions de combustions du méthane et du butane : application des concepts introduits précédemment <b>N4</b> <i>Séances 4 et 5</i> <i>[1h58min]</i>
	Etude de l'évolution de la masse au cours de la réaction de combustion du fer : application du principe de conservation de la matière <b>N5</b> <i>Séance 5</i> <i>[30min20]</i>
	Exercices d'entraînement à l'équilibre d'équations de réactions <b>N6</b> <i>Séance 5</i> <i>[10min]</i>
	Correction de l'évaluation et rappels <b>N7</b> <i>Séance 6</i> <i>[1h30min]</i>

Figure 126 : synopsis de la séquence d'Henri en phase 2

L'introduction du cycle du carbone appartient à l'enjeu N2, relatif à l'étude de la réaction de combustion du carbone (Figure 127).

Enjeux de niveau N	Enjeux/tâche de niveau N-1	Phases de l'action (étapes ou organisation pour atteindre l'enjeu)
Etude de la réaction de combustion du carbone : application des concepts introduits précédemment, lien avec le cycle du carbone et prévention de l'intoxication au monoxyde de carbone N2 [41min30]	Introduction combustion du carbone N21 [10 :18 à 16 :30 / TdP 41 à 71]	Définition de la combustion et triangle du feu N21a [10 :18 à 15 :20 / TdP 41 à 65]
		Présentation combustion du carbone N21b [15 :20 à 15 :37 / TdP 65]
		Rappel nomenclature N21c [15 :37 à 16 :30 / TdP 65 à 71]
	Comparaison combustion du carbone dans l'air et dans le dioxygène pur N22 [16 :30 à 21 :55 / TdP 71 à 85]	Prévision du phénomène observé N22a [16 :30 à 17 :48 / TdP 71 à 75]
		Réalisation des expériences N22b [17 :48 à 20 :47 / TdP 75 à 81]
		Rappel composition de l'air N22c [20 :47 à 21 :55 / TdP 81 à 85]
	Modélisation de la combustion N23 [21 :55 à 45 :49 / TdP 85 à 200]	Prévision des produits de la réaction N23a [21 :55 à 24 :02 / TdP 85 à 114]
		Appel à l'équation de réaction pour conclure N23b [24 :02 à 26 :38 / TdP 114 à 118]
		Rappel test à l'eau de chaux N23c [26 :38 à 34 :01 / TdP 118 à 163]
		Réalisation test à l'eau de chaux N23d [34 :01 à 40 :11 / TdP 164 à 184]
		Retour à l'équation de réaction N23e [40 :11 à 41 :49 / TdP 184 à 186]
	Mise en relation avec le cycle du carbone N24 [45 :49 à 51 :52 / TdP 200 à 231]	Equilibre de l'équation de réaction à l'aide des modèle moléculaires N23f [41 :49 à 45 :49 / TdP 186 à 200]
		Présentation du cycle du carbone N24a [45 :49 à 46 :06 / TdP 200 à 209]
		Interprétation des flèches : transformations chimiques N24b [46 :06 à 48 :29 / TdP 209 à 213]
		Mise en évidence du rôle des activités humaines dans le déséquilibre du cycle N24c [48 :29 à 50 :17 / TdP 213 à 229]
		Illustration du principe de conservation N24d [50 :17 à 51 :52 / TdP 229 à 231]

Figure 127 : extrait du synopsis de la séance 3 chez Henri (phase 2)

Sur l'extrait de synopsis ci-dessus, nous choisissons volontairement de ne pas faire apparaître la dernière colonne relative aux micro-événements liés aux objets, pour ne pas surcharger le paragraphe.

L'extrait sur lequel portent nos analyses intervient au niveau du sous-enjeu N24, entre les minutes 45 : 49 et 51 : 52. Celui-ci est précédé par l'introduction de la définition de la combustion (N21), la démonstration de la combustion du charbon dans l'air et dans le dioxygène pur (N22), et la modélisation de la combustion aboutissant à l'équilibre de l'équation de réaction (N23). La combustion du carbone a donc le statut d'illustration du modèle qui vient d'être présenté aux élèves (Extrait 25).

125) Ens : (reprise – le cycle du carbone est projeté au tableau) alors est-ce que vous connaissez ce ce petit schéma

126) Els : oui

127) E19 : c'est de la géo non†

128) E11 : non c'est en bio

129) E15 : non c'est en bio

130) Ens : c'était en quoi ça†

131) Els : en géo

132) Ens : en géo† ouais†

133) Els : brouhaha

134) Ens : c'était en géo† alors qu'est-ce qui heu chut / qu'est-ce qu'il vous apprend ce hum ce graphique† E12† qu'est-ce qu'il vous montre ce graphique ce ce schéma† c'est le titre† regardez le titre† c'est† (remarque discipline)

135) E1? : le cycle du carbone

136) Ens : c'est le cycle du carbone donc sur Terre y'a du y'a l'élément carbone qui est présent sous différentes formes dans différentes molécules d'accord, donc le carbone est présent dans les végétaux dans les animaux et donc il fait un cycle ça veut dire quoi il fait un cycle,

137) El : il est recyclé

138) Ens : il est recyclé d'accord, donc heu donc les sous quelle forme les les végétaux absorbent le carbone, cours de biologie El5, sous quelle forme les végétaux absorbent le carbone (*grésillement micro*) / alors le jour «fin plutôt le jour là ben les végétaux absorbent le co2 d'accord donc regardez donc heu le co2 rentre dans les végétaux entre guillemets donc par photosynthèse puis les végétaux se dégradent d'accord heu et ils se transforment en pétrole par exemple ou en charbon puis l'activité volcanique heu rejette ce carbone qui a été transformé dans l'air donc en fait ça fait un cycle vous avez ici les les quantités de du carbone en en quoi, c'est quoi GT Gigatonnes vous vous rappelez des préfixes, voilà, Gigatonnes, alors les océans aussi absorbent le co2 d'accord, pourquoi les algues ou les ou les différents organismes qui consomment heu qui consomment du co2 donc heu est absorbé et une partie du co2 est aussi rejetée dans l'air globalement ce cycle il est comment, si vous comptez ou même sans compter rapidement ce cycle heu naturel là il est naturel hein on peut dire qu'il est équilibré c'est à dire que y'a autant de carbones qui est absorbé par la nature qui était qui après qui XX par la nature donc en fait ce cycle il est bien équilibré, aujourd'hui ce cycle malheureusement il n'est plus équilibré pourquoi, à cause de qui,

139) El8 : des arbres

140) Ens : c'est pas à cause des

141) El8 : y'a beaucoup plus de heu de co2 qui est rejeté

142) Ens : ouais pourquoi, y'a plus de volcans,

143) El8 : non y'a plus de hum d'animaux «fin

144) Ens : alors les qu'est-ce qui manque sur l'image qui a aujourd'hui en plus, qu'est-ce qu'il manque sur l'image en fait

145) El8 : les voitures

146) Ens : voilà des voitures donc y'a plus de pollution bon y'a aussi moins d'arbres qui absorbent donc en fait si on regarde le hum le même graphique mais heu (*affiche le cycle anthropocène*) aujourd'hui actuellement voilà vous voyez en rouge les rejets de donc de carbone sous forme co2 donc vous voyez que si vous comptez là les gigatonnes émis par les usines par les incendies et par heu ouais la transformation du pétrole vous voyez qu'y a beaucoup plus de co2 dégagé que de co2 absorbé voilà d'où le l'augmentation de du co2 dans l'air et l'effet de serre qui augmente ouais,

147) El2 : et c'est dans (*grésillement du micro*) c'est qui est absorbé d'ce côté

148) Ens : alors dans l'eau heu c'est les les plantes qui prennent le co2, les plantes prennent le co2 donc les algues les XX et l'océan en lui-même absorbe, d'accord, l'eau ça absorbe un peu le co2 et c'est qui est rejeté ben écoute le 4 je sais pas trop c'est qui est rejeté 4 tu vois ça correspond aux animaux donc les animaux marins dégagent du co2 (*grésillement du micro*) je sais pas si Marie tu peux m'aider là-dessus ouais

149) Ch : (*fait signe positif*)

150) Ens : oui,

151) El8 : XX les animaux (partiellement inaudible à cause du micro qui grésille)

152) Ens : les animaux,

153) El8 : ben j'pense parce que vu que les XX

154) Ens : oui c'est ça ouais ouais voilà donc tous les élevages heu heu d'animaux bovins et autres ben dégagent plein de co2 d'accord, voilà donc actuellement y'a un déséquilibre de ce cycle bon hormis cet aspect un peu un peu écologique heu le fait de voir que le carbone a un cycle ça rejoint c'est qu'on a vu c'est à dire que la matière se conserve, d'accord, le le carbone là il est brûlé d'accord au cours d'un incendie ou d'un volcan y'a du carbone qui est brûlé et ben après ce carbone il est réabsorbé, nous à notre échelle on a on a heu vu c'est où, c'est là voilà (affiche le document de la combustion du carbone) on a vu heu que le carbone voilà il pouvait se transformer mais sans disparaître donc on a bien un cycle, sauf que là le carbone il est solide il est pas heu entre guillemets polluant quand il est sous forme de charbon quand on heu on le brûle il devient du co2 donc il devient un gaz à effet de serre

155) El? : du coup c'est pas bien

156) Ens : voilà c'est pas bien, ouais c'est ça ouais ouais donc brûler tout à fait donc quand on brûle du carbone ou de l'essence ou ou d'autres pro composés on a souvent du co2 qui est dégagé d'accord donc c'est cette transformation elle conserve l'élément carbone mais sous différentes molécules, sous les sous sous la forme de charbon ben c'est du charbon c'est entre guillemets pour notre planète c'est pas grave par contre dégager du co2 aujourd'hui ben c'est ça pose problème, puisqu'on a on a trop de on a trop de co2 dans l'atmosphère donc on a on a trop d'effet de serre heu qui augmente voilà c'était juste pour vous donner cette info, ok,

*Extrait 25: « cycle du carbone et conservation de la matière » chez Henri (phase 2 — séance 3) [45 : 49 à 51 : 52]*

#### *10.2.3.1.2 Éléments de la relation contrat didactique-milieu*

Au début de l'extrait, les élèves reviennent dans la classe après la pause. Le milieu symbolique est alors constitué du cycle du carbone holocène projeté au tableau. Henri commence en posture d'accompagnement pour laisser aux élèves la possibilité de reconnaître ce schéma issu des MER de géographie de 10<sup>e</sup> année et de se remémorer les savoirs qu'il convoque. Plusieurs élèves mentionnent les disciplines « biologie » et « géographie ». L'enseignant, toujours en posture d'accompagnement, les oriente vers le titre du schéma pour aider son interprétation et faire avancer le temps didactique. Un élève occupe cette responsabilité en lisant le titre à voix haute. Henri adopte alors une posture de surplomb pour instituer ce trait pertinent, puis il interprète le cycle à l'aide du principe de conservation

de l'élément carbone. Son discours est alors situé au niveau du modèle microscopique. Puis il dévolue aux élèves la responsabilité d'interpréter le concept de « cycle ». Un élève se saisit de cette responsabilité et accélère le temps didactique en indiquant que le carbone est « recyclé ». Henri institue cette réponse et poursuit en posture de surplomb par une description des différents phénomènes biologiques et géologiques représentés sur le cycle et des substances que ces phénomènes consomment et produisent. Il conclut cette description par une réflexion à propos des quantités de dioxyde de carbone ainsi produites et consommées pour affirmer que le cycle holocène est « équilibré », provoquant une accélération du temps didactique. Il introduit alors l'idée d'un cycle déséquilibré à l'heure actuelle et confie aux élèves la responsabilité d'identifier l'origine du déséquilibre. Pourtant à cet instant aucun élément du milieu ne permet de répondre à cette question. La prise en charge de cette responsabilité repose donc uniquement sur les connaissances personnelles des élèves. C'est pourquoi E18 produit tout d'abord un trait non pertinent : en s'appuyant sur le cycle du carbone projeté au tableau, elle mentionne les arbres, le temps didactique ralentit transitoirement. Henri adopte une posture d'accompagnement pour réguler cette réponse et E18 produit immédiatement après un trait pertinent relatif à l'augmentation de l'émission de dioxyde de carbone dans l'atmosphère, le temps didactique avance. Cette intervention mobilise le registre de la biologie, du point de vue de la chimie, elle se situe au niveau de la réalité idéalisée. L'enseignant poursuit dans sa posture d'accompagnement pour aider E18 à préciser l'origine de l'augmentation des quantités de dioxyde de carbone atmosphérique. E18 mentionne alors une augmentation du nombre d'animaux. Il s'agit d'un trait pertinent dans le cadre du modèle du cycle du carbone, mais trop implicite pour faire avancer le temps didactique. En effet à travers cette réponse, nous supposons que l'élève fait référence aux icônes représentant des êtres humains et des animaux d'élevage à l'origine de la flèche rouge symbolisant la respiration animale. Or, si l'origine de l'augmentation de la production de dioxyde de carbone dans l'atmosphère est bien anthropique — et implique notamment l'élevage intensif —, il s'agit d'un phénomène distinct de la respiration — phénomène qui, rappelons-le, a un effet minime sur l'augmentation de l'effet de serre. Aussi, l'enseignant introduit la vision dualiste de la relation humain-nature en remarquant que certains éléments manquent sur le cycle du carbone actuellement étudié. Il confie alors aux élèves la responsabilité de les identifier. E18 saisit cette responsabilité et accélère le temps didactique en citant les voitures. Henri bascule alors en posture de surplomb pour instituer ce trait pertinent et projeter au tableau le cycle du carbone anthropocène en mentionnant une augmentation de la pollution. Pour expliciter cela, il décrit les phénomènes d'origine anthropique qui figurent désormais sur le cycle en plus des phénomènes « naturels ». La version du cycle choisie par Henri est une version quantifiée qui fait mention des quantités de substances transformées exprimées en Gigatonnes d'équivalents CO<sub>2</sub> (Figure 128). Il

s'appuie donc sur ces données chiffrées pour démontrer le déséquilibre du cycle qu'il interprète comme une « augmentation de CO<sub>2</sub> dans l'air » et donc de l'effet de serre.

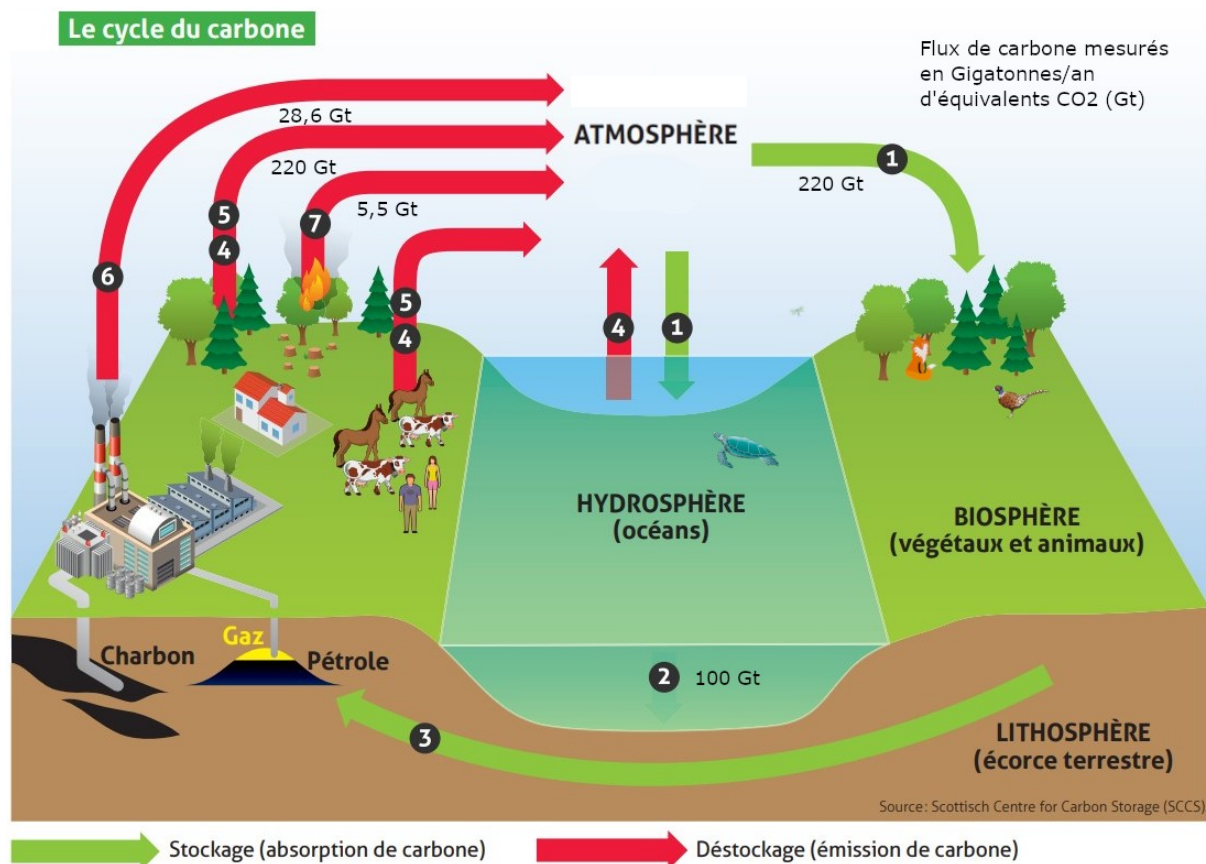


Figure 128 : cycle du carbone anthropocène quantifié utilisé par Henri

À ce moment de l'extrait, le discours se situe toujours au niveau de la réalité idéalisée et fait référence aux phénomènes tels que modélisés dans le registre de la chimie. Le modèle de l'effet de serre est un implicite, tout comme le problème complexe lié à son origine qui n'a pas été énoncé jusqu'alors. Henri est interrompu par E12 qui ralentit la progression du savoir en manifestant son incertitude à propos de l'interprétation de la flèche verte reliant atmosphère et hydrosphère. L'enseignant se place alors en posture de surplomb pour expliquer à la fois la photosynthèse réalisée par les végétaux aquatiques (numéro 1 sur le schéma) et la dissolution du dioxyde de carbone atmosphérique dans les océans (numéro 2). Durant cette régulation, il exprime sa propre incertitude et interpelle la chercheuse qui filme la séance au fond de la classe pour demander de l'aide. Celle-ci approuve ce qui vient d'être dit par un signe de la main positif. Puis E18 revient soudain sur son raisonnement à propos de l'augmentation du nombre d'animaux. Il est vrai que le cycle du carbone anthropocène soutient ce raisonnement grâce notamment aux nouvelles icônes symbolisant l'élevage intensif. Le temps didactique progresse. L'enseignant se place en posture de surplomb pour instituer ce trait pertinent dans le milieu et conclure sur le dioxyde de carbone produit par les bovins qui induit un « déséquilibre du cycle ». Sans transition, il propose une analyse du cycle en termes de conservation de l'élément carbone en décrivant les différentes espèces chimiques dans lesquelles celui-ci est stocké ainsi que les transformations subies par ces espèces chimiques. Son discours se situe alors au niveau de la réalité idéalisée. Cette description s'achève sur la combustion du charbon qui transforme le carbone en « CO<sub>2</sub> » ou « gaz à effet de serre ». Un élève produit un trait pertinent en regard de cette dernière assertion, qui introduit la dimension

négative des GES pour l'environnement : « c'est pas bien », provoquant une accélération du temps didactique. Henri s'appuie sur ce trait pertinent pour conclure en posture de surplomb à propos des différentes espèces chimiques contenant du carbone et leurs effets sur l'environnement (le charbon, l'essence, le dioxyde de carbone). Pour cela, il mobilise le principe de conservation de la matière au niveau du modèle microscopique en mentionnant l'élément contenu dans les molécules. C'est le seul moment de l'extrait où le modèle du cycle du carbone et le modèle de la réaction chimique sont explicitement mis en relation.

**Pour résumer, dans cet extrait, Henri utilise le cycle du carbone pour illustrer le principe de conservation des atomes introduit précédemment. Cependant, il mobilise dans son discours le concept d'élément, étranger pour les élèves.**

**L'étude du cycle du carbone est aussi l'occasion d'aborder un problème environnemental : l'origine anthropique du réchauffement climatique. Ce problème n'est jamais explicitement formulé et apparaît dans le milieu sous l'expression « le déséquilibre du cycle du carbone ». De plus, les responsabilités confiées aux élèves dans la construction de ce problème reposent essentiellement sur leurs connaissances personnelles — en particulier les effets des activités industrielles sur l'augmentation du dioxyde de carbone atmosphérique. La posture de surplomb adoptée par Henri ainsi qu'une faible structuration du milieu n'offrent pas de réels moments de dévolution et donc de collaboration dans la construction des savoirs visés. Ainsi, Henri pilote un raisonnement mettant en relation les activités des sociétés industrielles, l'augmentation de la pollution — traduit comme une augmentation du dioxyde de carbone atmosphérique — et l'augmentation de l'effet de serre. Sa conclusion porte sur le constat du déséquilibre du cycle du carbone et notamment une focale placée sur les substances carbonées ayant des effets sur l'atmosphère (les gaz à effet de serre<sup>97</sup>), soutenue par le principe de conservation de l'élément carbone. C'est dans ce moment de conclusion uniquement que les différents modèles disciplinaires sont explicitement mis en relation par l'enseignant.**

#### *10.2.3.1.3 Interprétations*

L'analyse de cet extrait significatif à l'échelle micro met en évidence la centration d'Henri sur le niveau de réalité idéalisée. En effet, sa description des phénomènes représentés sur le cycle du carbone se fait plutôt dans les registres de la biologie/géologie, sans que des liens explicites avec le modèle de la réaction chimique soient faits avant la fin de l'extrait (dernier tour de parole).

Du point de vue de la biologie/géologie, le cycle du carbone représente des « flux de matière » par des flèches entre différents compartiments (atmosphère, biosphère, hydrosphère, lithosphère) (Orange & Orange, 1995). Il est question, en particulier, de la respiration animale et végétale, de la photosynthèse, de la dissolution du dioxyde de carbone dans l'eau (océans), de la combustion du charbon, du volcanisme et de la décomposition de la matière organique. Ces phénomènes sont considérés comme consommant ou produisant des espèces chimiques composées de carbone. Ils relèvent parfois de mécanismes complexes, mettant en jeu un enchaînement de réactions chimiques (photosynthèse, respiration). Le détail de ces mécanismes n'est pas considéré à l'échelle du cycle du carbone. Dans le cas des respirations animale et végétale et de la photosynthèse, leur rôle dans la production d'énergie nécessaire au fonctionnement des organismes est particulièrement mis en avant en biologie. Cette dimension n'est pas

---

<sup>97</sup> Ce terme n'est pas employé par Henri.

prise en compte dans le cadre d'une étude des échanges de matière au sein du cycle du carbone. Dans le cadre de la chimie, ces flèches peuvent être interprétées comme des transformations chimiques, modélisées comme des réactions chimiques (Kermen, 2018). Le principe de conservation de la matière semble particulièrement important pour comprendre la présence de l'élément carbone dans tous les compartiments du cycle (Mohan et al., 2009; Zangori et al., 2017). Enfin, chacune de ces réactions ne se déroule pas à la même échelle de temps. Par exemple, la réaction de décomposition de la matière organique et la réaction de formation des ressources fossiles (charbon, gaz, pétrole) sont des réactions significativement plus longues que la combustion de ces substances. Une étude des temps de réaction des différents phénomènes permet de comprendre que les activités humaines issues de la révolution industrielle accélèrent la production de dioxyde de carbone dans l'atmosphère, tout en consommant sans arrêt des hydrocarbures qui ont été formés pendant des dizaines de millions d'années. Les activités développées avec l'ère industrielle bousculent donc le rythme des phénomènes de production/consommation du carbone présent dans le cycle.

Dans le cadre de cet extrait, Henri ne modélise pas explicitement les phénomènes comme des réactions chimiques, mais se contente de déclarer, en posture de surplomb, que l'élément carbone est présent dans tous les compartiments du cycle. S'il mobilise avec cette intervention le niveau microscopique du modèle, cette modélisation s'appuie sur le niveau de réalité idéalisé en faisant référence aux substances interprétées dans les registres de la biologie/géologie, ignorant le niveau macroscopique du modèle de la chimie. Ce résultat illustre la révision du modèle d'organisation des savoirs en chimie que nous proposons dans le chapitre 2 pour adapter le modèle de Kermen (2018) à l'enseignement de la chimie au secondaire I (cf. 2.3.1). Aussi, si différents modèles disciplinaires sont présents dans cet extrait (indicateur de codisciplinarité I2), ceux-ci ne sont pas directement mis en relation pour interpréter les phénomènes (I4).

Ce problème de mise en œuvre de la codisciplinarité pourrait être provoqué par le manque de définition du problème complexe au début de l'extrait (I1). En effet, le problème de l'augmentation du dioxyde de carbone atmosphérique, identifié comme un gaz à effet de serre n'intervient qu'au tour de parole 138, sous-entendu dans l'idée de « déséquilibre » du cycle du carbone introduite dans le milieu par l'enseignant. Pourtant, la comparaison des deux représentations du cycle du carbone, holocène et anthropocène permet de mettre en évidence une augmentation du nombre de flèches rouges représentant l'émission de dioxyde de carbone dans l'atmosphère. Mais Henri choisit de ne pas présenter le cycle du carbone anthropocène au moment où il introduit la notion de déséquilibre, il s'appuie alors exclusivement sur les connaissances personnelles des élèves. La chronogenèse ralentit à ce moment de l'extrait, d'une part parce que les élèves doivent interpréter correctement ce qu'Henri désigne en mentionnant « le déséquilibre » du cycle, sans éléments concrets du milieu auquel se raccrocher, d'autre part parce que leurs connaissances à propos de l'anthropocène sont très certainement inégales.

De plus, la posture topogénétique haute occupée par Henri au cours de cet extrait, en particulier dans les moments de description du modèle du cycle du carbone, contraste avec sa posture de retrait qui confie l'institution du sens des flèches reliant atmosphère et hydrosphère à la chercheuse au tour de parole 148. À travers cette interaction directe avec la chercheuse, Henri semble manifester son manque de maîtrise du modèle qui a lui a été suggéré. Ainsi il provoque une rupture du contrat de recherche en cherchant la confirmation de cette dernière, alors même qu'elle l'a laissé libre d'utiliser le cycle du carbone dans sa séquence comme il l'entend. Henri aurait pu choisir de ne représenter sur le schéma que les phénomènes

qu'il traite dans sa séquence ordinaire, ce qui lui aurait évité de se trouver dans une posture inconfortable face à la question d'une élève pour laquelle il n'a pas la réponse. L'insertion de la greffe paraît alors « forcée » à ce moment de l'extrait.

Du point de vue de la codisciplinarité, les conditions préalables que nous avons formulées en introduction de ce chapitre (cf. 10.1) : présence d'un problème complexe et présence d'au moins deux matrices disciplinaires, semblent satisfaites. Toutefois, si les modèles de la combustion et du cycle du carbone sont mobilisés pour comprendre l'origine anthropique de l'augmentation des gaz à effet de serre dans l'atmosphère à la fin de l'extrait (indicateur I5), la mise en relation explicite de ces différents modèles fait défaut. C'est pourquoi nous nous interrogeons sur la compréhension par les élèves du problème environnemental dont il est question ici, en particulier du rôle de la réaction chimique pour le modéliser, notamment parce que l'enseignant dévolue peu cette responsabilité au cours de l'extrait. L'étude du rapport au savoir d'Henri apporte des éléments qui permettent d'interpréter la prévalence de sa posture de surplomb dans cet extrait relatif au cycle du carbone.

#### 10.2.3.1.4 *Éléments du rapport au savoir de l'enseignant*

La mise en perspective du discours d'Henri en entretien post-observations de la phase 2 et de son action en situation permet de mettre en évidence que ses objectifs d'enseignement-apprentissage pour cette séquence sont orientés vers l'appropriation du modèle de la réaction chimique.

Tout d'abord, nous identifions une concentration de l'enseignant sur la maîtrise du langage de la chimie par les élèves, considéré indépendant de leur capacité à modéliser. En effet, dans l'extrait suivant (Extrait 26), Henri rapporte être soucieux que les élèves utilisent les bons termes pour interpréter un phénomène, alors même qu'elles et ils semblent comprendre le modèle de la réaction chimique.

142) Ens : donc là j'hésite soit on on arrête là soit on on on approfondit encore un peu je je je refais encore une synthèse voir s'ils ont compris et encore une éval
143) Ch : ok donc pour toi en fait
144) Ens : je me pose la question
145) Ch : là les enjeux qui étaient importants et que t'as l'impression qu'ils ont pas atteints c'était quoi↑
146) Ens : c'était heu hum distinguer atome molécule
147) Ch : ouais
148) Ens : il sont encore vendredi passé quand ils cherchaient dans le tableau ils cherchaient des molécules tu vois↑ et heu ben équilibrer
149) Ch : mh
150) Ens : équilibrer trouv pourquoi on équilibre et puis comment comment comment on procède sinon globalement j'pense qu'ils ont ils ont compris que ça se transformait quand même
151) Ch : ouais
152) Ens : qu'y a bien une matière qui disparaissait et d'autres qui apparaissaient

153) Ch : d'accord mais du coup ils ont compris que ça se transformait sur un plan macroscopique↑ / c'est à dire la matière elle disparaît la matière heu elle apparaît  
154) Ens: ouais

*Extrait 26: extrait de l'entretien post-observations avec Henri (phase 2) [05 : 49 à 07 : 02]*

L'appropriation du principe de conservation des atomes apparaît comme étant un deuxième enjeu fort pour Henri, comme le montre l'extrait d'entretien ci-dessous (Extrait 27).

184) Ch : heu pour toi quel était l'enjeu là mis à part que c'était une proposition qui venait de moi pour toi de l'insérer là à ce moment-là heu ça servait à quoi↑  
185) Ens : et ben ça hum ça confirme le principe de conservation  
186) Ch : ouais  
187) Ens : d'la matière  
188) Ch : ok ok  
189) Ens : ça leur fait un argument de plus pour que ouais qu'ils qu'ils voient bien le le le cycle de la matière sans sans qu'il y ait de disparition d'apparition et de heu ouais que ce soit plus cohérent là-dessus  
190) Ch : ok et heu pour toi c'est un enjeu fort ça le principe de conservation↑  
191) Ens : ouais  
192) Ch : ouais↓  
193) Ens : parce qu'après on voit ça dans dans l'énergie tu vois↑  
194) Ch : mh mh  
195) Ens : donc c'est important

*Extrait 27: extrait de l'entretien post-observations avec Henri (phase 2) [09 : 25 à 09 : 56]*

Nous voyons à travers cet extrait que même l'étude du cycle du carbone consiste en une occasion d'appliquer le principe de conservation des atomes, non pas au service de l'étude d'un problème environnemental, mais pour illustrer le concept introduit lors des séances précédentes.

Ces éléments du rapport au savoir d'Henri à propos du cycle du carbone permettent d'éclairer la posture épistémologique qu'il adopte au cours de cet extrait. Cette dernière mise en relation avec les attributs du savoir en question et la stratégie didactique développée, éléments inférés des analyses à l'échelle micro, nous permettent de reconstruire la configuration didactique correspondante.

#### *10.2.3.1.5 Discussion des configurations didactiques*

Dans l'extrait « cycle du carbone et conservation de la matière », plusieurs modèles disciplinaires sont introduits dans le milieu, les savoirs sont donc pluriels (Simonneaux, 2011, p. 91). Cependant, la posture épistémologique adoptée par Henri peut être qualifiée de scientifique, dans le sens où les savoirs scientifiques sont présentés de manière académique, sans recherche apparente de problématisation (Simonneaux, 2011, p. 117). Aussi, la stratégie didactique semble osciller entre historique/doctrinale et problématisante. En effet, nos analyses micro outillées par le triplet de genèses montrent une prévalence de la posture topogénétique haute de l'enseignant au cours de cet extrait. Bien qu'il devolve l'identification de certains phénomènes du cycle du carbone aux élèves, l'élaboration du milieu et le contrôle de l'avancée du savoir restent à sa main. Aussi, les élèves ont peu d'espace pour contribuer à

la co-construction du problème complexe soulevé par la comparaison du cycle du carbone. Henri choisit de l'introduire dans le milieu de façon surplombante. La mise en perspective de ces trois dimensions pourrait correspondre à une configuration hiérarchique au sens de Simonneaux (2011, p. 149) (Figure 129).

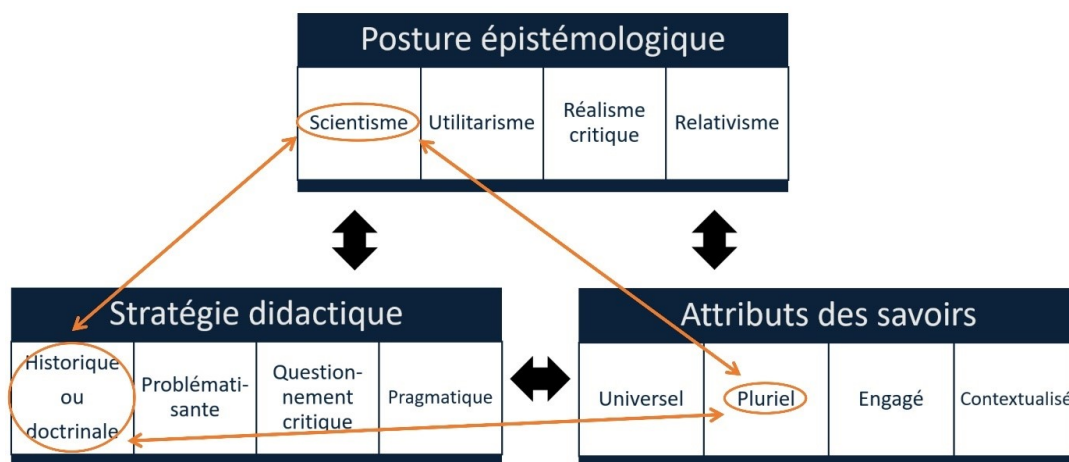


Figure 129 : reconstruction de la configuration didactique pour l'extrait « cycle du carbone et conservation de la matière »

En effet, l'enjeu final de cet extrait est porté sur l'illustration du principe de conservation des atomes au cours de la réaction chimique. Henri mobilise les différents modèles disciplinaires dans l'objectif de démontrer ce principe. Bien que certaines responsabilités soient confiées aux élèves, l'aménagement du milieu ne leur permet pas de contribuer à l'avancée du savoir. Nous nous retrouvons alors dans un modèle descendant de la transmission des savoirs, dans lequel l'enseignant surplombe la situation. Ces résultats à propos de la gestion du milieu, des territoires et des temporalités ne sont pas sans conséquence sur la mise en œuvre de la codisciplinarité, comme le montre le schéma élaboré à partir de la séquence d'Henri.

#### 10.2.3.1.6 Schéma de la codisciplinarité d'Henri

Le schéma de la codisciplinarité d'Henri que nous reconstruisons à partir des synopsis de séances et des analyses à l'échelle micro de l'extrait « cycle du carbone et conservation de la matière » (Figure 130) diffère de celui de Gauthier (Figure 111) et de Nino (Figure 124), présentés dans ce chapitre. Ce schéma montre en effet une structure plus linéaire que les précédents. Les matrices disciplinaires chimie (rectangles bleus) et biologie/géologie (rectangles verts) sont convoquées l'une après l'autre et permettent d'esquisser un problème complexe (indicateurs de codisciplinarité I4 et I5). Cependant, l'élaboration du problème ne comporte que deux étapes, pilotées par l'enseignant, en posture de surplomb. Nous observons également un manque de continuité dans la formulation du problème entre les deux étapes. Ce dernier est tout d'abord introduit de façon implicite dans le milieu à travers la mise en évidence d'un déséquilibre du cycle du carbone holocène. Puis la conclusion porte sur la mise en évidence du principe de conservation de l'élément carbone à travers les compartiments. La mention finale de l'augmentation de l'effet de serre arrive sans contextualisation préalable, en absence du modèle de l'effet de serre et même du concept de gaz à effet de serre dans le milieu.

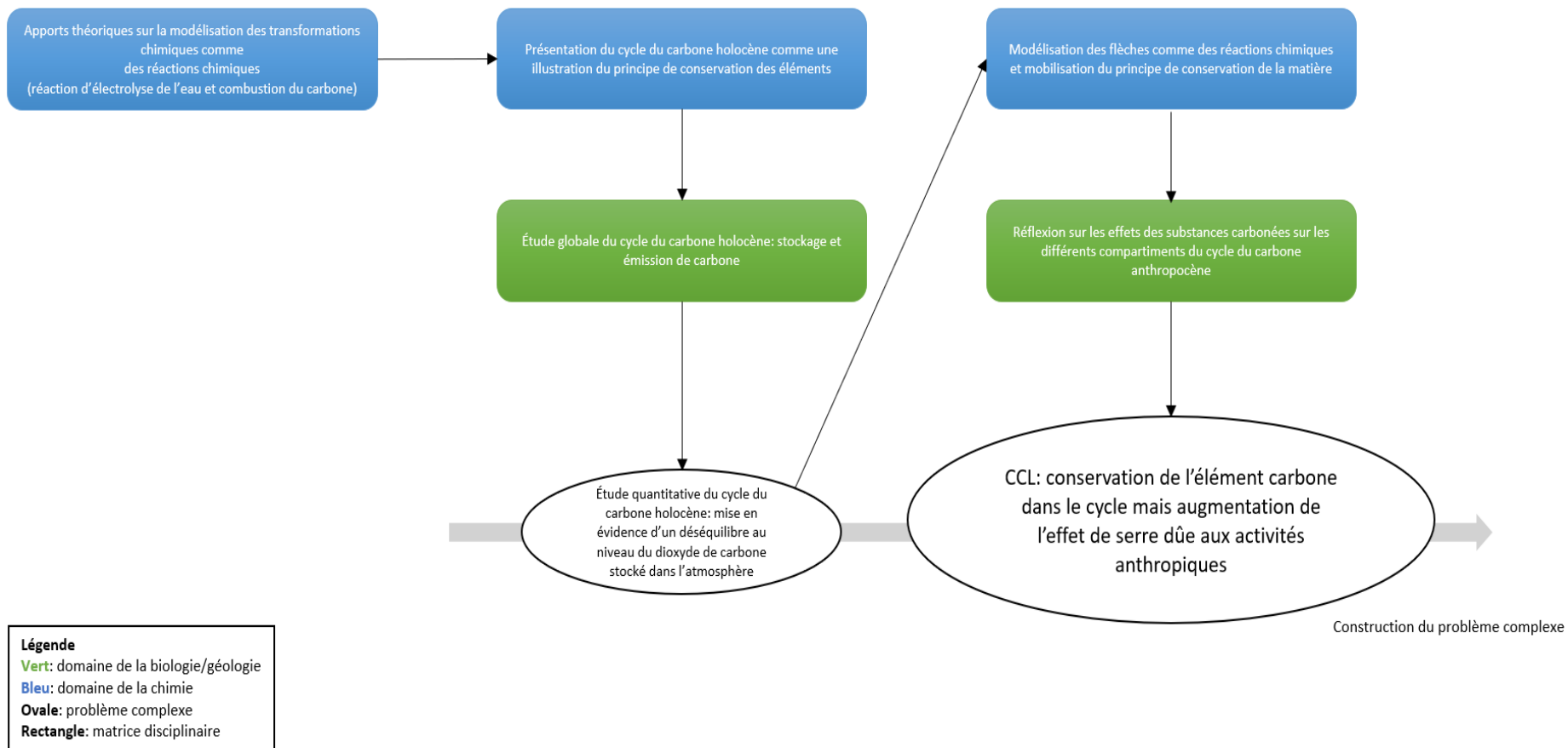


Figure 130 : schéma de la mise en œuvre de la codisciplinarité chez Henri (phase 2)

Défaut d'explicitation du problème complexe d'une part, posture topogénétique de surplomb d'Henri d'autre part, contribuent à freiner la mise en œuvre de la codisciplinarité dans cette séquence, bien que les conditions de cette mise en œuvre soient réunies (CP1 et CP2, I1, I2, I5) (Figure 131).

CP1: Traitement d'un problème complexe	CP2: Au moins deux matrices disciplinaires sont présentes	I1: Identifier le problème/la question/la tâche	I2: Les caractéristiques importantes des objets de savoir sont présentes dans le milieu	I3: Certains objets de savoir sont mis en tension dans le milieu	I4: Le phénomène est interprété à l'aide de différents modèles disciplinaires	I5: La mise en relation des modèles permet de répondre à la question/au problème initial
oui	oui	déséquilibre du cycle du carbone (séance 3)	principe de conservation de l'élément carbone, gaz à effet de serre	élément vs atome, pollution vs effet de serre	flux de matière interprétés comme des réactions chimique (géré par Henri) (séance 3)	idée de l'augmentation de l'effet de serre (introduite par Henri) (séance 3)

Figure 131 : tableau récapitulatif des indicateurs de codisciplinarité reconstruits à partir de la séquence d'Henri (phase 2)

Aussi, la conclusion menée par Henri à propos de l'augmentation du dioxyde de carbone atmosphérique d'origine anthropique et donc de l'effet de serre esquisse la formulation du problème environnemental. Mais les nombreux implicites relatifs à la mise en relation des modèles du cycle du carbone, de la réaction chimique et de l'effet de serre nous font douter de la bonne compréhension du problème par l'ensemble des élèves.

#### 10.2.3.1.7 Du côté des élèves

Au cours de l'entretien post-observations avec les élèves à l'issue de la phase 2, le cycle du carbone n'apparaît pas spontanément dans les bilans des savoirs (au sens de Charlot, 1997). Bien que les entretiens soient menés à la fin de la séance 3, séance au cours de laquelle Henri présente le cycle du carbone aux élèves, nous retrouvons dans les explications des élèves des références aux activités expérimentales, aux équations de réaction chimique et au modèle de la réaction chimique (pour le bon élève seulement).

E11, considérée comme faible vis-à-vis de ses résultats en physique-chimie, est incapable de modéliser les situations 1 et 2 relatives à la combustion du charbon et à la fusion de la glace malgré notre accompagnement. Constatant qu'elle se trouve en difficulté, nous décidons de clore l'entretien à la suite de l'étude de ces deux situations (Extrait 28).

95) Ch : ouais mais pourquoi là c'est noir et ça a une forme solide et puis là on voit plus rien c'est sous forme gazeuse↑ qu'est-ce qui s'est passé en fait entre le début et la fin↑

96) E11 : hum ben là on voit que ça commence à à à partir on va dire je sais pas exactement comment le dire alors que heu ben fin on voit bien que à la fin y'a plus rien et c'est heu une situation où heu ça se heu j'perds mes mots

Extrait 28: entretien post-observations avec E11 — Classe d'Henri (phase 2) [06 : 15 à 06 : 46]

Lorsque nous présentons le cycle du carbone<sup>98</sup> à E12, élève qui a de bons résultats en physique-chimie, il interprète les flèches rouges comme la représentation de l'émission de CO<sub>2</sub> et les flèches vertes comme l'absorption de O<sub>2</sub>. Cette interprétation semble reprendre le bilan de la réaction de respiration. E12 nous explique également que le CO<sub>2</sub> qui est rejeté par les activités humaines industrielles « ça pollue ça n'est pas bon pour l'environnement ». À ce moment de l'entretien, E12 ne mobilise pas les modèles disciplinaires pour expliquer le problème environnemental dont il a néanmoins identifié l'origine. Cependant, alors que nous l'invitons à mettre en lien la situation 1 (la combustion d'un morceau de charbon dans une enceinte fermée) et le cycle du carbone, il produit une explication du modèle de l'effet de serre en appui sur le principe de conservation de la matière (Extrait 29). Son discours tend vers la codisciplinarité.

154) Ch : ouais, ok est-ce que tu vois le lien du coup entre ça et ça (*montre la représentation de la combustion du charbon et le cycle du carbone*) la réaction de combustion

155) E12 : lui aussi (*pointe la transformation physique*) ou je

156) Ch : non que la situation 1

157) E12 : ok ben / ben ça serait un peu heu / le le premier bocal ça serait ça pourrait être heu ben c'est la Terre qui est un peu enveloppée par la la couche d'ozone et puis heu ben y'a du co2 qui s'dégage mais qui peut pas sortir et du coup heu ben c'est un peu comme le phénomène heu de la Terre qui se réchauffe

*Extrait 29 : : entretien post-observations avec E12 — Classe d'Henri (phase 2) [08 : 54 à 09 : 57]*

Les indices apportés par l'étude des discours des élèves tendent à confirmer l'incertitude que nous formulons en conclusion des analyses de l'extrait « cycle du carbone et conservation de la matière » : l'enseignant implique peu les élèves dans la co-construction du savoir ainsi que dans l'étude du problème complexe convoqué par le cycle du carbone. Ce dernier n'est d'ailleurs jamais clairement défini en tant que tel par l'enseignant. Aussi, l'écart au niveau des apprentissages est d'autant plus important que le modèle de la réaction chimique, savoir central de la séquence d'Henri, qui fait l'objet des trois séances précédant cet entretien, échappe à l'élève la plus faible (E11). Une fois de plus, le « bon » élève s'appuie à la fois sur les modèles scientifiques et les modèles quotidiens pour interpréter le problème complexe et identifier le lien entre « la pollution » et le réchauffement planétaire. La posture de surplomb adoptée par Henri tout au long de l'extrait « cycle du carbone et conservation de la matière » ne nous permet pas d'accéder à des indices de la compréhension des élèves dans l'interprétation du cycle du carbone dans le registre de la chimie. Toutefois, compte tenu du peu d'implication des élèves dans cet extrait, nous formulons l'hypothèse selon laquelle une majorité d'entre elles et eux rencontre les mêmes difficultés que E11. Ainsi, pour ces élèves, un défaut de maîtrise du modèle de la réaction chimique les prive des conditions de mise en œuvre de la codisciplinarité et donc, les empêche d'accéder à l'étude de la complexité soulevée par la question environnementale.

### *10.2.3.2 Aurélie, rattrapée par le temps*

Après son introduction dans la séance 1 que nous avons étudiée à travers l'analyse de l'extrait « un cycle du carbone déséquilibré » (cf. 10.2.2.1), le cycle du carbone réapparaît dans la séquence d'Aurélie en

<sup>98</sup> Nous utilisons le guide d'entretien présenté avec le cas de Gauthier dans la section 10.2.1.9.1.

conclusion de la dernière séance (séance 5). L'extrait « combustions et anthropocène » rapporte ce moment de conclusion (cf. Figure 115 pour replacer l'extrait dans le synopsis de la séquence d'Aurélié).

### 10.2.3.2.1 Présentation de l'extrait « combustions et anthropocène »

L'enjeu de la séance 5 concerne tout d'abord un retour sur l'activité expérimentale réalisée lors de la séance précédente : l'expérience de combustion du butane (enjeu N94), en particulier l'identification des réactifs et des produits de la réaction. Puis plus de la moitié de la séance consiste à réaliser des exercices d'écriture et d'équilibre d'équations de réactions (trente-cinq minutes environ, enjeu N95). L'enjeu N10 relatif à la conclusion à propos des conséquences des activités anthropiques sur le cycle du carbone intervient dans les trois dernières minutes de la séance (Figure 132).

Enjeux de niveau N	Enjeux/tâche de niveau N-1	Phases de l'action (étapes ou organisation pour atteindre l'enjeu)
Etude du cas des combustions (TP réaction de combustion du butane) : illustration des principes introduits précédemment N9 [46min]	Conclusion du TP combustion du butane N94 [02 :46 à 12 :39/ TdP 1 à 15]	Identification des substances engagées (réactifs et produits) N94a [02 :46 à 12 :39/ TdP 1 à 15]
	Entraînement à l'écriture et équilibre d'équations de réaction N95 [12 :39 à 48 :30/ TdP 15 à 220]	Rappel sur l'écriture de l'équation de réaction N95a [12 :39 à 14 :32 / TdP 15 à 19]
		Rappel sur l'équilibre de l'équation de réaction N95b [14 :32 à 20 :51/ TdP 19 à 33]
		Explicitation des exercices à résoudre N95c [20 :51 à 35 :34/ TdP 33 à 101]
		Correction collective des exercices N95d [35 :34 à 48 :30/ TdP 101 à 220]
Conclusion sur le cycle du carbone : conséquences des activités humaines sur l'environnement N10 [3min]	Mise en relation du cas des combustions et dioxyde de carbone atmosphérique N101 [48 :30 à 51 :17/ TdP 220 à 228]	Retour sur le cycle du carbone anthropocène, comparaison au cycle du carbone holocène N101a [48 :30 à 51 :17/ TdP 220 à 228]

Figure 132 : extrait du synopsis de la séance 5 d'Aurélié (phase 2)

Dans l'extrait de synopsis qui figure ci-dessus, nous choisissons de ne pas faire apparaître la colonne relative aux micro-événements relatifs aux objets pour alléger le tableau et ne pas freiner la lecture. L'analyse à l'échelle micro qui suit porte sur la phase de l'action N101a, plus précisément au niveau des minutes 48 : 36 à 51 : 10 (Extrait 30).

122) Ens : ça va sonner dans une minute / alors chut demande le silence – les éls s'agitent pour ranger leurs affaires) alors chut / (affiche les cycles du carbone au tableau) / on a vu / (remarque discipline) on a vu au milieu du chapitre à peu près / ce cycle-là j'vous rappelle ça s'appelle le cycle du

123) El? : carbone

124) Ens : carbone

125) Els : ah oui carbone

126) Ens : bon on a vu qu'il y avait différentes flèches (la sonnerie retentit – demande à El-Yan de fermer la porte) j'en ai pour 2 secondes vous vous rappelez les flèches en vert / c'était les flèches qui vont absorber qui vont stocker le carbone c'est pour ça qu'on appelle le cycle du carbone parce qu'on va la on regarde le carbone chut est-ce qu'il est absorbé est-ce qu'il est stocké ou est-ce qu'au contraire il va être émis (remarque discipline)

126) Ens : / les flèches en rouge chut au contraire c'est le carbone qui va être émis on a vu que à cause de l'activité humaine / y'avait beaucoup plus de flèches rouges (*remarque discipline*) donc chut on a vu que les flèches rouges c'est ce qui était émis notamment y'a beaucoup de choses qui sont émises par la l'activité humaine alors juste / et après j'vous laisserai regardez tout c'qui est combustions donc que ce soit la déforestation heu le la con le volcanisme la combustion heu où est-ce qu'elle qu'il y avait une flèche et ben par rapport aux êtres humains tout c'que nous on va libérer d'accord les déchets quand on brûle les déchets chut (*remarque discipline – attend que les éls se calment*) que la combustion tout donc en fait on a étudié ça ça ça et ça c'est des formes de combustions différentes d'accord les usines y'a les combustions des déchets etc là quand on quand y'a les forêts qui brûlent c'est les combustions de végétaux etc ça va libérer du carbone, c'est c'qu'on a vu / d'accord, on voit qu'y a le co2 qui s'est for qui est qui est libéré d'accord dans l'atmosphère bon, heu chut / à l'inverse dans l'exercice on vient de parler de photosynthèse la photosynthèse qu'est-ce que ça va faire elle va prendre le dioxyde de carbone elle prend du carbone du coup dans le co2 y'a du du carbone / et elle va libérer du du dioxygène dans l'air donc en fait c'est un le cycle du carbone ça vous montrer qu'en fait le carbone l'élément carbone l'atome de carbone l'élément plutôt carbone il est dans plein de transformations, celles qu'on a vues et celles qu'on qu'on a étudiées peu importe chut et qu'malheureusement ça a un peu déséquilibré maintenant avec les activités humaines, est-ce que c'est compris

127) Els : (*tous en même temps*) OUI

*Extrait 30: « combustions et anthropocène » chez Aurélie (phase 2 — séance 5) [48 : 36 à 51 : 10]*

#### 10.2.3.2.2 *Éléments de la relation contrat didactique-milieu*

Au début de l'extrait, Aurélie tente d'obtenir l'attention des élèves qui rangent déjà leurs affaires dans la perspective de la sonnerie de fin de séance qui devrait retentir d'une minute à l'autre. Après cette régulation liée à la discipline du groupe, l'enseignante projette au tableau les deux cycles du carbone présentés en introduction — holocène et anthropocène. Elle se place en posture de surplomb, mais confie aux élèves la responsabilité d'identifier ces représentations, certainement pour s'assurer que les élèves écoutent ce dont il est question. Plusieurs élèves répondent en même temps qu'il s'agit du cycle du carbone, faisant avancer le temps didactique par cette intervention.

Aurélie poursuit en posture de surplomb, posture qu'elle conservera jusqu'à la fin de la séance. Elle revient notamment sur l'interprétation du cycle dans les registres de la biologie/géologie en attribuant aux flèches vertes la représentation de l'absorption/du stockage du carbone, et aux flèches rouges la représentation de l'émission du carbone.

Puis elle modélise les phénomènes d'origine anthropique comme des combustions (usines, combustion des déchets, déforestation). À ce moment de l'extrait, le modèle de la réaction chimique est sous-entendu derrière le concept de combustion. Aussi la mise en relation des différents modèles disciplinaires est confiée aux élèves, car elle reste implicite dans le discours de l'enseignante, qui se situe au niveau de la réalité idéalisée. Le principe de conservation des atomes n'est pas rappelé à ce stade. Pourtant, c'est sur ce principe que repose l'idée de boucle fermée des transformations de matières carbonées représentées

sur le cycle du carbone. Mais le niveau microscopique du modèle est introduit dans le milieu par Aurélie alors qu'elle interprète le phénomène de photosynthèse dans le registre de la chimie. Pour cela en effet, elle évoque « le carbone dans le CO<sub>2</sub> ». Le niveau microscopique du modèle de la chimie lui permet alors de conclure quant au principe de conservation de l'atome de carbone au sein des transformations chimiques mises en jeu dans le cycle. Son discours mobilise également le terme « élément », concept inconnu des élèves de 4<sup>e</sup>, toutefois plus cohérent du point de vue du savoir savant. Elle termine en affirmant que les activités humaines ont déséquilibré le cycle.

**Pour résumer, à travers l'analyse de cet extrait, nous relevons une première interprétation du cycle du carbone dans le registre de la biologie/géologie, rapidement mise en relation par Aurélie avec le modèle des combustions (registre de la chimie). La mise en perspective de ces différents modèles, en particulier la mobilisation du principe de conservation pour mettre en évidence la conservation de l'atome<sup>99</sup> de carbone à travers les différents compartiments, permet à l'enseignante de conclure à propos de l'origine anthropique de déséquilibre du cycle du carbone. Comme observé précédemment chez Henri, le problème complexe n'est pas explicitement formulé, mais sous-entendu derrière l'idée du déséquilibre. De plus, bien que l'articulation des modèles garantisse une structuration satisfaisante du milieu, la posture surplombante d'Aurélie dans cet extrait prive les élèves de tout accès à la co-construction du savoir. La structure de ce moment de conclusion de la séquence pourrait fonctionner, *a minima*, selon la logique d'un « cours dialogué » (Hersant, 2004), dans les faits, la majorité de l'extrait consiste en un monologue de l'enseignante.**

#### 10.2.3.2.3 Interprétations

Dans l'extrait « combustions et anthropocène », les deux conditions préalables à la mise en œuvre de la codisciplinarité sont présentes. L'enseignante aborde l'anthropocène (CP1) à l'aide des modèles des disciplines scolaires « biologie », « géologie » et « chimie » (CP2). Cependant, le modèle de la réaction chimique reste un implicite tout au long de l'extrait, présent derrière la mention des « combustions », mais jamais interprété en termes de réarrangements d'atomes. Ainsi, l'indicateur de codisciplinarité relatif à la présence dans le milieu des caractéristiques importantes du savoir (I2) n'est que partiellement satisfait.

Au moment de la conclusion, Aurélie est responsable de la mise en relation des modèles disciplinaires (I4) et de la formulation du problème complexe soulevé par la mise en relation de ces modèles (I5) — les conséquences des activités anthropiques industrielles sur le déséquilibre du cycle (Figure 133).

---

<sup>99</sup> Aurélie utilise indifféremment les termes « atome » et « élément ».

CP1: Traitement d'un problème complexe	CP2: Au moins deux matrices disciplinaires sont présentes	I1: Identifier le problème/la question/la tâche	I2: Les caractéristiques importantes des objets de savoir sont présentes dans le milieu	I3: Certains objets de savoir sont mis en tension dans le milieu	I4: Le phénomène est interprété à l'aide de différents modèles disciplinaires	I5: La mise en relation des modèles permet de répondre à la question/au problème initial
oui	oui	« déséquilibre » du cycle du carbone	flux de matière, combustions, photosynthèse, conservation de l'élément carbone	non	flèches du cycle du carbone modélisées comme des réactions chimiques (géré par Aurélie)	les combustions d'origine anthropique ont déséquilibré le cycle du carbone (géré par Aurélie)

Figure 133 : tableau récapitulatif de la définition des indicateurs de codisciplinarité pour l'extrait « combustions et anthropocène » chez Aurélie (phase 2)

Toutefois, le problème complexe reste sous-entendu sous le « déséquilibre » mentionné par l'enseignante. Le constat de l'augmentation de la température terrestre, soutenu par le modèle de l'effet de serre, ne fait pas partie du milieu. De plus, l'origine de l'augmentation du dioxyde de carbone dans l'atmosphère n'est pas explicitement reliée à l'expérience de combustion que les élèves ont réalisée et qui a pourtant été rappelée en début de séance 5. Le modèle de la réaction chimique participe donc peu à la compréhension de l'origine du dioxyde de carbone atmosphérique dans cette conclusion. La posture topogénétique haute adoptée par Aurélie dans ce moment de conclusion rejoint les résultats des analyses des extraits « cycle du carbone et étude de la complexité » chez Gauthier et « réaction chimique et anthropocène » chez Nino, étudiés dans le chapitre 9 (cf. 9.2). Dans la conclusion de ce chapitre, nous formulons deux hypothèses pour expliquer le manque de dévolution dans ces extraits : le caractère nouveau de l'approche codisciplinaire que nous introduisons dans le système didactique à travers la greffe et la contrainte de la gestion du temps de la séance. Le cas d'Aurélie illustre particulièrement cette dernière hypothèse. Dès le début de l'extrait, la contrainte du temps est très forte et se manifeste par la précipitation des élèves qui se projettent déjà vers la fin de la séance. Aurélie doit réguler cette agitation afin d'avoir les conditions nécessaires pour revenir sur le cycle du carbone, introduit au cours de la séance 1. Cet effet de boucle est une dimension importante de la séquence qui apparaît également dans l'entretien de préparation 2 et dans son discours aux élèves lors de la séance 1, où l'enseignante définit le cycle du carbone comme « le fil rouge » de la séquence. Si la séquence est augmentée d'une séance par rapport à la phase 1 d'observations, Aurélie se trouve néanmoins en manque de temps à la fin de la séance 5 pour conclure sur le fil rouge. La posture de surplomb qu'elle adopte lui permet alors de garder le contrôle sur le milieu et d'accélérer le temps didactique dans les dernières minutes de la séance. Mais si la progression du savoir avance en apparence, nous n'avons pas de certitudes quant à l'implication des élèves dans ce processus.

L'ensemble de ces constats nous amène à dire que si les conditions d'une étude codisciplinaire de l'anthropocène sont réunies dans la séquence d'Aurélie, le manque de relations explicites entre les modèles et la posture surplombante adoptée par l'enseignante freinent probablement sa mise en œuvre. Les indices concernant les attributs du savoir et la stratégie didactique employée par Aurélie dans cet extrait, mis en regard de sa posture épistémologique, nous permettent de reconstruire la configuration didactique alors présente, élément de discussion complémentaire.

#### 10.2.3.2.4 Discussion des configurations didactiques

Les savoirs présents dans cet extrait sont pluriels, du point de vue de la diversité des modèles disciplinaires mobilisés (Simonneaux, 2011, p. 91). La réflexion sur les conséquences des combustions d'origine anthropiques sur l'environnement conduit Aurélie à adopter une posture épistémologique réaliste critique (Simonneaux, 2011, p. 117). Cependant, la stratégie didactique observée est de type historique/doctrinal du fait de la posture surplombante et institutionnalisante de l'enseignante qui induit un mode de communication non interactif (Simonneaux, 2011, p. 144) (Figure 134).

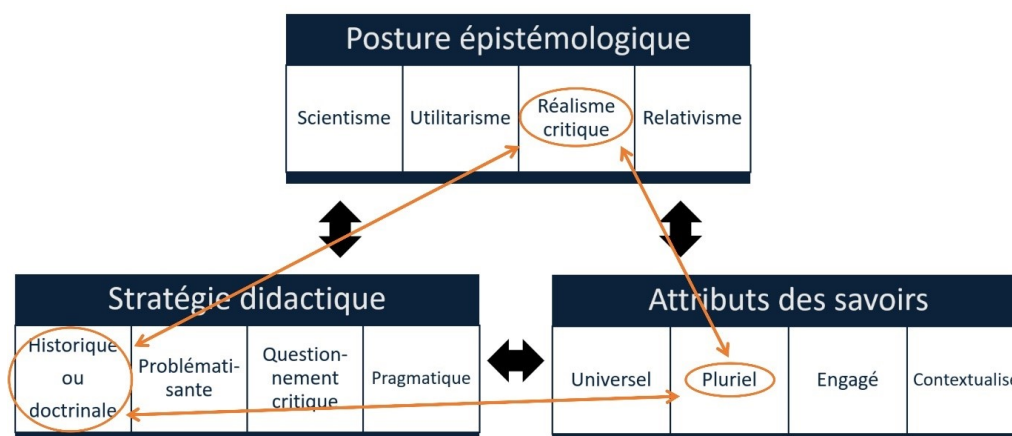


Figure 134 : construction de la configuration didactique pour l'extrait « combustions et anthropocène »

L'articulation de ces trois dimensions ne correspond à aucune configuration archétypique identifiée par Simonneaux (2011). Malgré la stratégie didactique doctrinale, nous pourrions dire qu'Aurélien oscille vers une stratégie didactique problématisante. En effet, l'enjeu de cette fin de séance est orienté vers la compréhension du problème environnemental soulevé par le cycle du carbone, à la lumière des savoirs de la biologie/géologie et de la chimie. Mais la construction du problème est à la main exclusive de l'enseignante qui l'introduit dans le milieu sans lien apparent avec le savoir qui vient d'être enseigné, comme une sorte d'argument d'autorité : « malheureusement ça a un peu déséquilibré avec les activités humaines ». Ce résultat est probablement dû à la contrainte de temps que subit Aurélien en fin de séquence, dont nous venons de discuter. Il est intéressant de le mettre en perspective avec la configuration didactique reconstruite à partir de l'extrait « un cycle du carbone déséquilibré », problématisante cette fois-ci. Ce deuxième exemple montre que la stratégie didactique observée au cours de l'extrait « combustions et anthropocène » n'est pas constitutive de la pratique d'Aurélien, mais vraisemblablement contextuelle.

Aussi, le cas d'Aurélien diffère de celui d'Henri illustré à travers l'extrait « cycle du carbone et conservation de la matière », à partir duquel nous reconstruisons une configuration doctrinale. Bien que contrôlée par l'enseignante, la construction du problème est plus explicite chez Aurélien que chez Henri, ce qui favorise la mise en relation des modèles disciplinaires au cours de l'extrait. Bien que nous observions une posture de surplomb dans ces deux cas, les conséquences sur la mise en œuvre de la codisciplinarité ne sont pas les mêmes. Ceci s'illustre clairement sur le schéma de la codisciplinarité élaboré à partir de la séquence d'Aurélien.

#### 10.2.3.2.5 Schéma de la codisciplinarité chez Aurélie

Le schéma de la mise en œuvre de la codisciplinarité dans la séquence d'Aurélié montre la boucle formée entre l'introduction du cycle du carbone et du problème environnemental au début de la séquence et le retour sur ce problème à la fin (Figure 135).

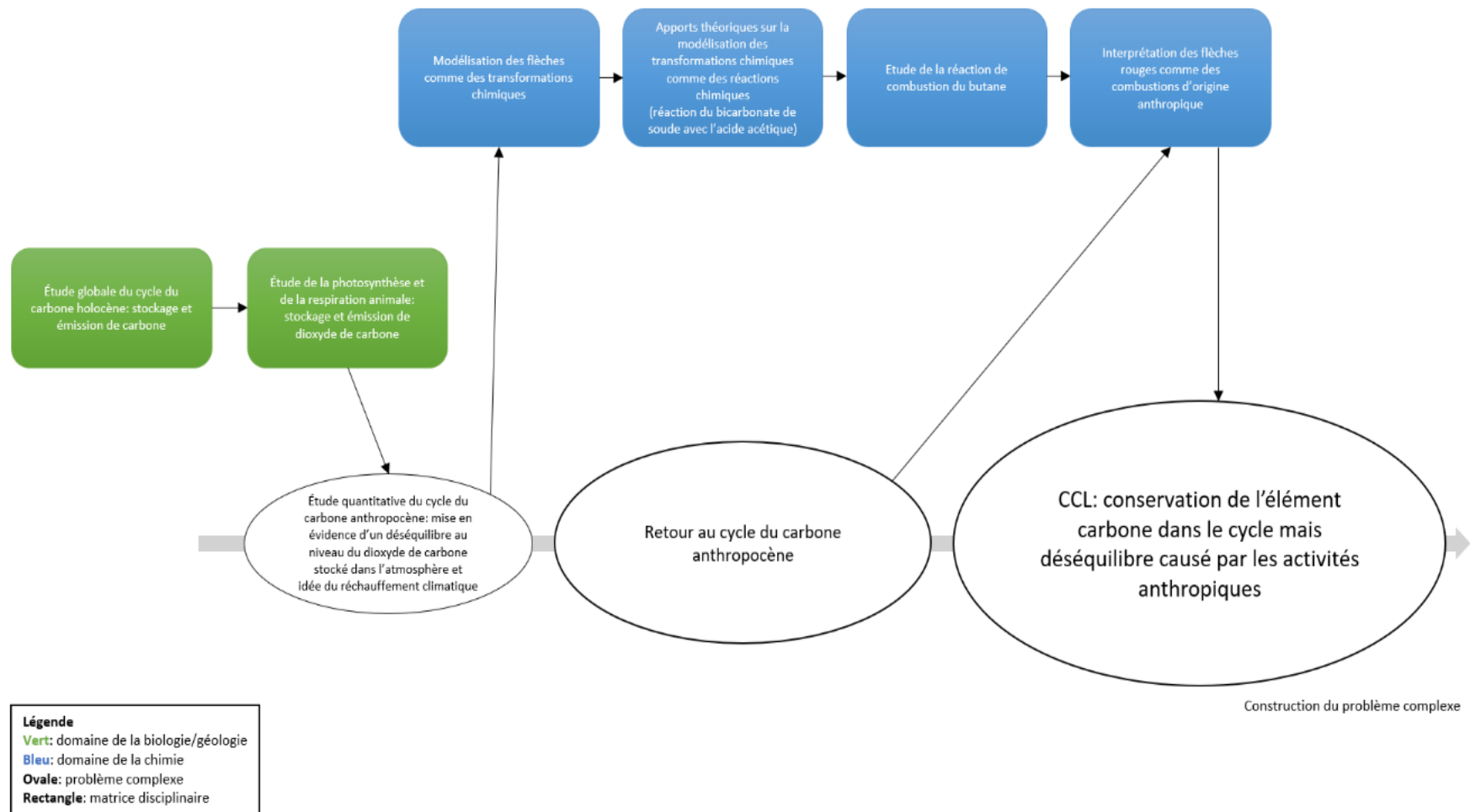


Figure 135 : schéma de la mise en œuvre de la codisciplinarité chez Aurélie (phase 2)

Ce schéma montre aussi que le cycle du carbone, initialement présenté comme « fil rouge » de la séquence, n'est finalement présent qu'en introduction et en conclusion. Dans les faits, les transformations chimiques étudiées dans la séquence ne sont pas directement recontextualisées dans le cadre du cycle du carbone. En particulier la réaction de combustion du butane, qui fait pourtant l'objet d'une séance complète de travaux pratiques (séance 4) et qui n'est finalement pas repositionnée sur la flèche rouge du cycle du carbone anthropocène correspondante. À l'inverse, la réaction du bicarbonate de soude avec l'acide acétique qui fait l'objet des séances 2 et 3 n'a finalement que peu de lien avec le fil rouge de la séquence. Sa persistance dans la séquence en phase 2 peut s'interpréter comme un reliquat de la séquence ordinaire, qui s'insère en périphérie de la greffe, au prix de la cohérence de la séquence.

Enfin, nous observons sur le schéma de la codisciplinarité, un retour sur le problème complexe à la fin de la séquence, mobilisant les différents modèles disciplinaires étudiés au fil des séances. L'analyse à l'échelle micro de l'extrait « combustions et anthropocène » a montré que le grand nombre d'implicites relatifs au modèle de la réaction chimique ne fournit pas aux élèves un milieu suffisamment structuré pour comprendre la place du modèle dans l'interprétation de l'anthropocène. Défaut de structuration du milieu, auquel s'ajoute la posture topogénétique haute de l'enseignante qui laisse finalement peu de place aux élèves pour participer à la co-construction du problème. Dans ces conditions, quelles traces de ce problème complexe peut-on trouver dans le discours des élèves à propos de la séquence ?

#### 10.2.3.2.6 Du côté des élèves

Nous retrouvons l'écart dans les apprentissages en fonction du niveau des élèves relevé dans les classes de Gauthier et d'Henri, dans les entretiens post-observations menés auprès des élèves d'Aurélien au terme de la phase 2. E11 est un très bon élève selon l'enseignante, du point de vue de ses résultats — c'est le meilleur élève de la classe —, et étant donné son engagement dans le processus d'apprentissage. Les synopsis des séances montrent qu'il s'agit souvent d'un élève chronogène (Sensevy, 1998). Aussi au cours de l'entretien il nous confie être particulièrement attiré par les sciences qu'il aimerait continuer à étudier dans l'objectif de devenir ingénieur.

Cet élève ne cite pas spontanément le problème environnemental dans son bilan de savoirs. Toutefois, lorsque nous lui présentons le cycle du carbone « inconnu » (cf. Figure 114), il parvient immédiatement à l'interpréter en termes de transformations de la matière. Nous l'interrogeons alors sur le possible lien entre la combustion du charbon représentée sur la situation 1 et le cycle du carbone. Sa réponse mobilise explicitement le modèle de la réaction chimique et le principe de conservation de la matière pour expliquer le rôle des activités humaines dans l'augmentation du dioxyde de carbone atmosphérique (Extrait 31), manifestation d'un raisonnement codisciplinaire au service de l'étude de la complexité.

165) Ch : ok, hum / qu'est-ce qu'on peut comprendre avec ce schéma du coup à quoi ça sert de dessiner ce schéma†
166) E11 : ben à savoir si la Terre absorbe plus de co2 ou en émet plus
167) Ch : ouais†
168) E11 : donc là elle en émet plus vu que y'a plus d'activités humaines
169) Ch : ouais les activités humaines sur la Terre elle émettent heu beaucoup / et du coup est-ce que on peut faire un lien toi est-ce que t'arrives à faire un lien entre c'qui est représenté là en situation 1 et c'qui est représenté là en situation 3, est-ce que y'a une relation

170) E11 : oui parce que avec heu les flèches rouges nous disent que ça émet du heu dioxyde de carbone

171) Ch : oui

172) E11 : et heu là ben ils elles s'font pas créer «fin d'abord on prend de heu de l'o2 et heu du pétrole «fin de

173) Ch : oui

174) E11 : du carbone et heu après ça en fait heu ça fait du co2

175) Ch : oui

176) E11 : et heu la Terre elle fait juste prendre heu elle prend juste le le co2 elle n'en fabrique pas et elle le transforme en o2 /

177) Ch : donc en fait / là l'histoire du char du carbone et du pétrole (*situation 3*) / tu penses que ça a un lien avec ça? (*situation 1*)

178) E11 : ben oui parce que là y' aucun atome qui est créé ou que il heu ou disparu / c'est juste la transformation

*Extrait 31: entretien post-observations avec E11 — Classe d'Aurélié (phase 2) [07 : 26 à 08 : 38]*

Selon l'enseignante, E12 est un élève plus faible du point de vue de ses résultats en physique-chimie, néanmoins engagé dans le processus d'apprentissage et assidu. Au cours de la première partie de l'entretien, il rencontre des difficultés à citer les savoirs rencontrés dans la séquence qui vient de s'achever. Aussi, les documents que nous lui soumettons l'aident à remobiliser les concepts de transformations physique et chimique, mais seulement au niveau macroscopique du modèle. Il reconnaît le cycle du carbone d'après le schéma proposé en situation 3 (Figure 114) et interprète les flèches rouges et vertes comme des flux de carbone (registre de la biologie/géologie). Il ne semble pas faire de lien entre la situation modélisée en situation 1 (expérience de combustion du charbon) et les flèches du cycle du carbone.

À la fin de l'entretien, nous mettons en perspective les cycles du carbone holocène et anthropocène utilisés par Aurélié dans le cadre de la séquence pour reprendre le rôle du modèle de la combustion dans l'interprétation des phénomènes en jeu, en particulier l'accumulation de dioxyde de carbone dans l'atmosphère. Nous insistons en particulier sur son rôle dans l'effet de serre. C'est alors qu'E12 manifeste sa compréhension du problème environnemental en s'exclamant « mais du coup pourquoi ils font ça ? ». Dans l'étonnement (l'indignation ?) qu'E12 qui s'exprime face au constat des conséquences des activités humaines industrielles sur le réchauffement climatique, nous voyons la dimension éthique du problème complexe que nous venons d'étudier (Extrait 32). Son interrogation sous-entend un système de valeurs, en particulier la responsabilité des sociétés industrielles vis-à-vis des autres espèces. Notre accompagnement dans la mise en relation des modèles scientifiques a permis sa prise de conscience des enjeux relatifs à l'anthropocène.

261) El2 : ben quand c'est naturel y'a moins de ca de dioxyde de carbone qui est émis

262) Ch : mmh

263) El2 : et quand y'a une usine ben y'en a plus

264) Ch : mh

265) El2 : mais je sais pas si c'est bon ou si c'est mauvais

266) Ch : ah du le dioxyde de carbone↑ / est-ce que c'est bon ou mauvais de dioxyde de carbone dans l'atmosphère on en entend un peu parler à la télé aux infos en ce moment y'avait la cop 26 tu sais les états ils se voyaient pour parler de l'environnement et tout ça

267) El2 : la pollution j'crois

268) Ch : la pollution↓

269) El2 : oui

270) Ch : le dioxyde de carbone le co2 tu sais tu en as pas entendu parler↑ tu sais pas si c'est bon ou pas↑

271) El2 : non↓

272) Ch : en fait c'est un gaz qu'on dit il est à effet de serre /

273) El2 : ah effet de serre j'ai déjà entendu ça

274) Ch : qu'est-ce que c'est l'effet de serre tu sais↑

275) El2 : c'est quand y'a trop de pollution↑

276) Ch : ouais en fait les gaz ils vont dans l'atmosphère et ils vont garder la chaleur sur Terre et du coup il va faire de plus en plus chaud tu sais l'été il y a la canicule y'a des grands incendies et tout ça / et donc en fait émettre trop de co2 c'est dangereux pour la planète

*Extrait 32: entretien post-observations avec El2 — Classe d'Aurélie (phase 2) [13 : 42 à 14 : 43]*

Le cas d'El2 confirme le rôle central du modèle de la réaction chimique dans la mise en œuvre d'une étude codisciplinaire de l'anthropocène. Pour les élèves « plus faibles » comme El2, la mise en relation des modèles doit être suffisamment explicite pour qu'ils et elles puissent reconnaître dans le milieu les caractéristiques des matrices disciplinaires convoquées et pouvoir mobiliser les modèles nécessaires en dehors du cadre habituel.

Il est intéressant de voir à travers ces entretiens, que les réserves que nous émettions à la suite des analyses micro des extraits significatifs chez Aurélie, quant à la compréhension des élèves de l'origine du dioxyde de carbone atmosphérique (cf. 10.2.2.1 et 10.2.3.2), sont en partie contredites. La mise en perspective des discours d'élèves de niveaux nuancés nous permet cependant d'identifier dans la pratique d'Aurélie un effet de différenciation, ou *a minima*, de maintien des écarts d'apprentissages, en particulier dans l'accès aux savoirs complexes.

### 10.3 Conclusion du chapitre

#### 10.3.1 Vers un modèle générique de la codisciplinarité dans l'enseignement secondaire

L'étude à l'échelle micro d'extraits significatifs des pratiques de ces quatre enseignants et enseignantes apporte des réponses aux questions de recherche que nous formulions en introduction.

À propos de l'aménagement des séquences ordinaires pour intégrer le cycle du carbone à l'enseignement de la transformation chimique (QR1), les schémas de la codisciplinarité que nous avons construits (Figure 111, Figure 124, Figure 130, Figure 135) montrent le rôle central du problème complexe dans la structuration des séquences. Ce problème semble immédiatement convoqué par la comparaison des deux cycles du carbone, et apparaît dans chacune des séquences observées en phase 2.

L'hypothèse formulée au terme du chapitre 4 est donc confirmée : le cycle du carbone permet d'étudier un problème environnemental à la lumière des savoirs de chimie. Les nuances entre les différentes pratiques apparaissent dans le degré d'explicitation de l'étude du problème : de parfaitement explicite chez Gauthier à implicite chez Henri. Mais aussi dans la dévolution de la construction du problème aux élèves. Nous observons en particulier chez Nino et Henri une posture de surplomb qui laisse peu de place à la prise de responsabilité des élèves. Ce constat est renforcé par la reconstruction de configurations didactiques de type hiérarchique (Simonneaux, 2011, p. 149) à partir des extraits significatifs choisis dans ces deux études de cas.

De plus, l'étude du problème se fait en appui sur l'interprétation des situations par des modèles disciplinaires distincts (les phénomènes biologiques et géologiques mis en jeu dans le cycle du carbone, la réaction chimique, l'effet de serre, etc.). Par ailleurs, les modèles sont étudiés dans le cadre de leur matrice disciplinaire à l'échelle d'un enjeu. Ainsi, les savoirs spécifiques sont mobilisés au service de l'étude de la complexité.

Cette remarque nous amène à revenir sur une hypothèse que nous formulions au moment de l'analyse a priori (cf. 2.3). Elle concerne le caractère apodictique du cycle du carbone, qui de notre point de vue devrait permettre de créer la nécessité du modèle de la réaction chimique, dans la mesure où les élèves de 4<sup>e</sup>/11<sup>e</sup> année ne connaissent que les transformations physiques. Si ce levier didactique n'est pas saisi dans les cas que nous étudions, l'analyse micro montre parfois sa fonction de contextualisation des savoirs de chimie (Aurélien : « un cycle du carbone déséquilibré », Gauthier : « cycle du carbone et contextualisation » et Nino : phase de l'action N52a au début de la séance 3). Aussi les résultats montrent plutôt la nécessité d'une maîtrise préalable des modèles disciplinaires afin de pouvoir étudier le problème complexe. C'est pourquoi nous identifions dans ces approches codisciplinaires à la fois la possibilité d'apprentissages spécifiques, mais aussi leur mobilisation au service de l'étude de la complexité.

Les responsabilités accordées aux élèves en situation doivent correspondre à ces deux enjeux d'apprentissages. Dans ces conditions, les deux missions confiées à l'École, formation des scientifiques de demain et des citoyens et citoyennes, semblent possibles à travers l'enseignement de la chimie au secondaire I. L'ensemble de ces constats peut être modélisé dans un schéma générique de l'enseignement codisciplinaire au service de l'étude d'un problème complexe (Figure 136).

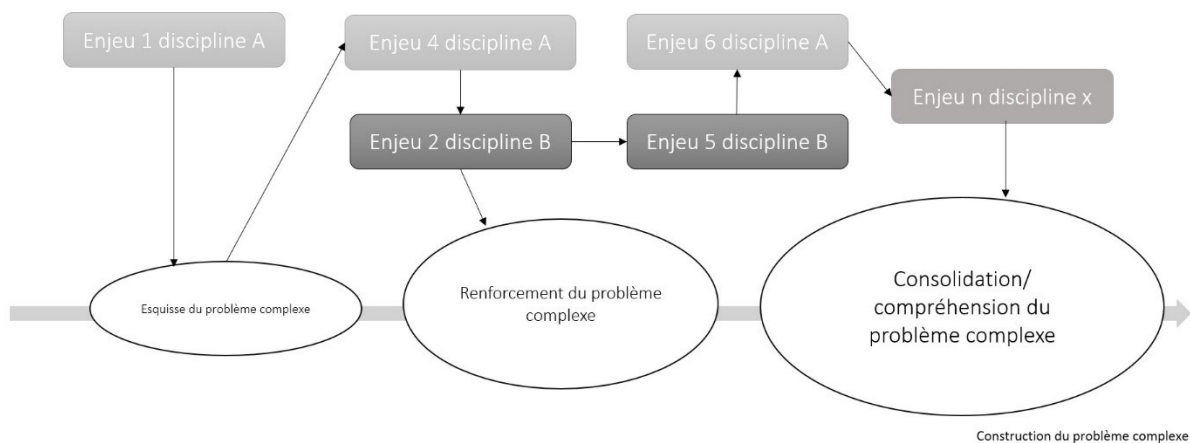


Figure 136 : représentation du modèle générique de la codisciplinarité au service de l'étude d'un problème complexe

La démarche codisciplinaire que nous décrivons ici peut s'envisager comme une forme spécifique d'interdisciplinarité au sens de Lenoir et Sauvé (1998), c'est-à-dire comme :

la mise en relation de deux ou de plusieurs disciplines scolaires qui s'exerce à la fois aux niveaux curriculaire, didactique et pédagogique et qui conduit à l'établissement de liens de complémentarité ou de coopération, d'interpénétrations ou d'actions réciproques entre elles sous divers aspects (finalités, objets d'études, concepts et notions, démarches d'apprentissage, habiletés techniques) (p. 12)

Cet auteur et cette autrice voient aussi dans cette approche un potentiel pour l'étude de la complexité, dans le respect des démarches et des épistémologies disciplinaires (cf. 4.1.3). Aussi, la démarche codisciplinaire que nous développons dans ce travail, en appui sur la définition initiale de Chevallard (2004), répond aux caractéristiques d'une telle interdisciplinarité, tout en proposant des moyens concrets de mise en œuvre dans les classes à partir d'une étude de la transposition didactique des savoirs impliqués.

La codisciplinarité précise l'interdisciplinarité parce qu'elle suppose la transposition didactique de savoirs au sein même des matrices disciplinaires, à l'échelle de la classe, par un enseignant ou une enseignante spécialiste ; savoirs qui constituent alors des outils mobilisables pour l'étude de la complexité. Quand l'approche interdisciplinaire préconise une entrée par la complexité, la mise en œuvre de la codisciplinarité en classe opère méthodiquement du spécifique vers le complexe. Se pose alors la question de la place accordée aux élèves dans la mise en œuvre d'une telle codisciplinarité en classe (QR2) et des conséquences sur les apprentissages en chimie (QR3), mais aussi du point de vue de la compréhension de l'origine anthropique du réchauffement climatique (QR4).

### 10.3.2 Conditions de mise en œuvre de la codisciplinarité et apprentissages des élèves

Tout d'abord, nous relevons chez Gauthier, Nino et Aurélie, la mise en œuvre d'une configuration didactique problématisante lorsqu'il est question d'aborder un problème environnemental soulevé par le cycle du carbone (le réchauffement climatique ou l'accumulation du dioxyde de carbone d'origine anthropique dans l'atmosphère), tandis que l'enseignement des savoirs disciplinaires relève plutôt d'une configuration didactique hiérarchique (voir l'analyse de l'extrait « l'électrolyse de l'eau » chez Nino dans la section 9.2.1.1). Selon Simonneaux (2011), la configuration problématisante est le plus souvent orientée vers la construction d'un problème que vers la recherche de solutions. Cet outil d'analyse nous

permet alors de faire le lien vers la construction d'un réseau conceptuel au service de la compréhension du réchauffement climatique. En effet, nous identifions dans le chapitre 4 la fonction d'objet-relais du cycle du carbone, c'est-à-dire un objet malléable permettant de faire le lien entre des domaines disciplinaires distincts, mais aussi son potentiel pour représenter les différents enjeux nécessaires à la compréhension de la dimension scientifique du problème du réchauffement climatique (cf. 4.3). En d'autres termes, et pour reprendre la métaphore de l'étoffe initiée par Morin (1982) pour illustrer la complexité, le cycle du carbone est le métier à tisser sur lequel sont amenés les fils de couleurs disciplinaires qui vont contribuer à former le motif du réchauffement climatique.

Retrouver des configurations didactiques problématisantes dans les pratiques enseignantes nous conforte dans le potentiel du cycle du carbone pour élaborer ce problème complexe depuis les disciplines scolaires. Toutefois, en dépit des configurations didactiques problématisantes, l'étude de la topogenèse tend à montrer que les élèves sont rarement responsables de l'élaboration du problème, ce qui nous interroge sur une problématisation effective. En reprenant l'expression de Fabre (2011), nous nous demandons si, à l'issue de cette séquence, les élèves disposent réellement de la boussole qui leur permettrait de s'orienter dans un monde problématique (cf. 1.2).

Ensuite, nous identifions des variations au niveau de la gestion de la mésogenèse, de la topogenèse et de la chronogenèse de ces quatre sujets enseignants. Nous observons en particulier un gradient au niveau de la complexité des enjeux d'enseignement-apprentissages associés à chaque séquence. Chez Gauthier, la structure des séances entremêle des enjeux relatifs à des savoirs de chimie, de physique et des savoirs complexes. À l'autre extrémité du gradient, chez Henri, l'enjeu semble focalisé sur l'appropriation du modèle de la réaction chimique. Entre les deux, Nino et Aurélie aménagent un enseignement de la transformation chimique qui permet, dans un second temps, l'étude d'un problème environnemental. Cette enseignante et cet enseignant se rejoignent sur la gestion de la topogenèse dans les moments de conclusion à propos du problème. Nous observons systématiquement un recul de la dévolution et une posture haute de la part de l'enseignant ou de l'enseignante, même chez Gauthier et Nino qui peuvent confier la responsabilité de mise en relation des modèles disciplinaires aux élèves dans d'autres moments de la séquence (Extraits « cycle du carbone et contextualisation », « respiration et pain au chocolat » et « la photosynthèse »). Le modèle du cycle du carbone peut alors fonctionner de façon implicite (chez Gauthier) ou mettre en avant un « déséquilibre » qui sous-entend le problème environnemental mis à l'étude (chez Aurélie et Henri). Chez Nino particulièrement, c'est la structuration du milieu orientée par une vision biologiste des phénomènes qui empêche d'élaborer les interprétations en termes de conservation de la matière, nécessaires pour l'étude de l'anthropocène. On assiste à une rupture de contrat didactique qui freine la chronogenèse.

Inévitablement, quand le milieu ne fournit pas les références suffisantes (ou quand celui-ci est trop complexe, comme c'est le cas chez Gauthier), les élèves qui réussissent en physique-chimie peuvent reconstruire davantage que les plus faibles. Nous identifions, en particulier, deux niveaux de références qui structurent un milieu favorable à la codisciplinarité.

Le premier niveau concerne la présence dans le milieu des modèles nécessaires pour l'étude du problème en question. Ceux-ci ont fait l'objet d'un enseignement dédié au cours d'une phase de l'action précédente (dans la séquence ou dans le cadre d'une autre matrice disciplinaire) et peuvent être rappelés par les élèves et institués par l'enseignant ou l'enseignante ou introduits par ce dernier ou cette dernière en posture surplombante.

Le second niveau concerne l'explicitation des matrices disciplinaires en présence afin que les élèves repèrent l'interprétation d'un modèle par un autre et mettent en relation des savoirs potentiellement enseignés dans des contextes différents. Si cette mise en relation est brouillée par la présence dans le discours de différents niveaux du modèle de la chimie (Kermen, 2018) ou par la confrontation de modèles scientifiques et quotidiens sans éléments d'explicitations, les élèves ne peuvent pas identifier depuis quelle matrice disciplinaire le phénomène est étudié et vers quelle matrice celui-ci doit être interprété. Nos résultats tendent à montrer que la deuxième dimension structurante du milieu est particulièrement nécessaire pour les élèves « faibles » qui, bien que maîtrisant le modèle de la réaction chimique, se trouvent en difficulté lorsqu'il s'agit de le mobiliser en dehors des tâches rencontrées dans le cours de chimie jusqu'alors. Ainsi, nos résultats montrent un lien entre indices de la compréhension d'un problème environnemental — complexe par définition — dans le discours des élèves et leur niveau en physique-chimie. Cet écart dans les apprentissages sera l'un des éléments de la discussion que nous présentons dans le chapitre 11.

## **CINQUIÈME PARTIE : PERSPECTIVES ET CONCLUSION**

## CHAPITRE 11 — DISCUSSION ET PERSPECTIVES

Dans ce chapitre, nous discutons les résultats issus de nos analyses. Dans une première partie, la recontextualisation des études de cas dans les profils obtenus par notre enquête par questionnaire montre la diversité des pratiques relatives à l'intégration des problèmes environnementaux dans l'enseignement de la chimie. Nous revenons ensuite sur la définition de la codisciplinarité, approche que nous choisissons pour favoriser une telle intégration. Dans une troisième partie, nous discutons l'ensemble des obstacles qui se dressent à la mise en œuvre d'une telle codisciplinarité en classe de chimie. Certains relèvent de la méthodologie dite « de la greffe » que nous avons employée, d'autres sont inhérentes aux contraintes des contextes institutionnels. Cette partie est l'occasion de discuter les caractéristiques épistémologiques des savoirs de chimie prescrits par le PER/programme de cycle 3/cycle 4. À travers cette discussion, nous tentons de dégager des pistes d'améliorations de l'enseignement de la chimie, notamment dans la recherche d'une meilleure continuité des apprentissages entre le secondaire I et le secondaire II. Enfin, nous discutons des apports de la double approche didactique de la chimie/didactique comparée pour l'étude des pratiques d'enseignement réalisée dans cette thèse.

### 11.1 Mise en évidence d'une diversité de pratiques à partir de déclarations et d'observations en situation

Au début de ce travail, nous relevions le potentiel de l'enseignement de la chimie au secondaire I pour aborder des problèmes environnementaux tels que l'origine anthropique du réchauffement climatique, tout en soulignant le manque d'études de pratiques à ce sujet (cf. Chapitre 2 et Chapitre 3). Notre enquête par questionnaire auprès d'un échantillon du corps enseignant français de physique-chimie interroge son intérêt pour les problèmes environnementaux ainsi que l'intégration de ces derniers dans les enseignements de chimie. Les résultats de cette enquête mettent en évidence une diversité de pratiques organisées selon trois « profils » (cf. 3.2.3).

Le profil 1, regroupe des individus que nous nommerons « intéressés et impliqués », car ils considèrent les problèmes environnementaux comme importants et déclarent les intégrer à leurs enseignements de physique comme de chimie. Nous pourrions rapprocher Gauthier de ce profil, d'après l'observation de ses pratiques ordinaires en phase 1. En effet, la séquence de cet enseignant propose l'étude de différents problèmes environnementaux causés par les activités anthropiques industrielles, avant même que nous lui suggérions d'utiliser le cycle du carbone.

Le profil 2 rassemble des individus pour qui les problèmes environnementaux sont importants sans toutefois les intégrer à leurs enseignements de physique-chimie. À ce titre, nous les nommerons « intéressés mais peu engagés ». Les sujets du profil 2 montrent également des incertitudes quant aux enjeux de l'étude des problèmes environnementaux à l'école, en particulier ils n'identifient pas toujours la dimension nécessairement interdisciplinaire d'un tel enseignement, ce qui peut traduire un défaut d'appréhension de la complexité de ces problèmes. Les pratiques ordinaires d'Aurélié et de Nino répondent à ce profil. Leurs séquences respectives à propos des transformations chimiques sont orientées vers l'enseignement-apprentissage du modèle de la réaction chimique et du principe de conservation des atomes, même après l'introduction du cycle du carbone. En phase 2, peu de place est accordée à l'étude de l'origine anthropique du réchauffement climatique au profit d'exercices d'équilibre d'équations de réactions chimiques.

Enfin, le profil 3 regroupe des individus que nous choisissons de nommer « désintéressés et peu engagés » en regard de leurs réponses au questionnaire. En effet, ceux-ci déclarent ne pas être sensibles aux problèmes environnementaux et ne considèrent pas que c'est le rôle des enseignements de physique-chimie que de les prendre en charge. Aussi, les individus du profil 3 n'intègrent que rarement de tels problèmes à leurs enseignements. L'étude des pratiques d'Henri nous amène à le rapprocher de ce profil. Cet enseignant constitue en effet le cas le plus récalcitrant à l'intégration du cycle du carbone en phase 2. Dans l'observation de ses pratiques, comme dans le discours recueilli au cours des entretiens, Henri considère cet objet comme un moyen d'illustrer le principe de conservation de la matière. Le problème environnemental soulevé par la modélisation des flèches du cycle comme des réactions chimiques semble un enjeu d'enseignement-apprentissage tout à fait second pour cet enseignant.

La recontextualisation de nos quatre études de cas par les profils issus de notre enquête par questionnaire illustre la diversité des rapports que les personnes qui enseignent la physique-chimie entretiennent aux problèmes environnementaux, ainsi que la diversité de leurs pratiques. Dans le cadre de notre étude des pratiques en situation, ces dernières s'expliquent notamment par le rapport des sujets à l'objet « cycle du carbone » que nous leur soumettons. Ce rapport a largement été discuté dans le chapitre précédent (chapitre 10). À travers ces résultats nous repérons le double statut confié au cycle du carbone selon les séquences : éléments de contextualisation des savoirs disciplinaires chez Aurélie, Henri et Nino, mais aussi support de l'étude d'un problème environnemental — l'origine anthropique du réchauffement climatique — chez Gauthier.

En tout état de cause, ces quatre études de cas apportent des éléments de réponse à la problématique que nous formulons au cours du chapitre 6 : « Comment l'enseignement de la chimie au secondaire I peut-il contribuer à la construction d'une CST qui concerne, en particulier, la compréhension de l'origine anthropique du réchauffement climatique ? ». Cette réponse consiste en une représentation du cycle du carbone.

## 11.2 Retour sur la définition de la codisciplinarité

Le premier résultat qui apparaît de nos analyses à l'échelle méso concerne les conditions de « prise » de la greffe — le cycle du carbone — chez les trois enseignants et l'enseignante objets de notre étude. En effet, dans chacune de ces classes, le cycle du carbone semble porteur de codisciplinarité, c'est-à-dire qu'il favorise l'articulation de différents modèles disciplinaires — parmi lesquels la réaction chimique — au service de l'étude d'un problème complexe lié au réchauffement climatique.

Ainsi, les indicateurs de codisciplinarité que nous identifions en appui sur une analyse épistémologique des savoirs impliqués dans le cycle du carbone (cf. 10.1), complètent l'analyse à l'échelle micro. Nous rappelons la définition de deux conditions préalables (CP) et de cinq indicateurs de codisciplinarité (I) :

- CP1 : présentation d'un problème complexe dans la situation
- CP2 : présence d'au moins deux matrices disciplinaires différentes
- I1 : définition explicite du problème/de la question/de la tâche au cours de la situation
- I2 : présentation des caractéristiques importantes des objets de savoirs disciplinaires dans le milieu
- I3 : mise en tension de certains objets de savoirs dans le milieu
- I4 : interprétation de la situation/du phénomène étudié(e) à l'aide de différents modèles disciplinaires

— I5 : réponse au problème/à la question soulevé(e) initialement par mise en relation des modèles disciplinaires

À l'échelle d'analyse micro, l'étude ascendante de la transposition didactique menée grâce à la reconstruction de la relation contrat didactique-milieu est outillée par le triplet mésogénèse, topogénèse, chronogénèse. Les signes reconstruits grâce à ces outils sur la base des traces de l'action des sujets contribuent en effet à définir les indicateurs de la codisciplinarité. Par exemple, les indicateurs I2 et I3 relatifs à la présence dans le milieu de caractéristiques importantes des objets de savoir ou, au contraire, à la mise en tension de savoirs appartenant à des registres différents sont aisément renseignés à partir d'une étude de la mésogénèse, outil d'analyse de la co-construction du milieu. La topogénèse en tant qu'étude du partage des responsabilités entre l'enseignant ou l'enseignante et les élèves peut, quant à elle, intervenir dans la définition des indicateurs I1 — ou définition initiale du problème/de la question/de la tâche — notamment si elle met en évidence des indices de la place accordée aux élèves dans ce processus. À ce titre, elle peut également contribuer à la définition des indicateurs I4 — articulation des différents modèles disciplinaires — et I5 — interprétation du problème complexe à l'aide des différents modèles disciplinaires. De même, la chronogénèse en tant qu'étude de l'avancée dans la construction du savoir, apporte des indices dans la définition de ces deux derniers indicateurs.

Si l'analyse du potentiel codisciplinaire de chaque extrait mis à l'étude dans le chapitre 10 se structure notamment grâce à la discussion de ces indicateurs, nous remarquons la moindre mobilisation de l'indicateur I3. Dans notre approche théorique de la codisciplinarité, nous anticipions des difficultés de structuration du milieu liées à la juxtaposition dans celui-ci de différentes matrices disciplinaires et de différents mondes (scientifique *versus* quotidien, cf. Tiberghien et Vince (2005)). Cette difficulté n'est finalement visible que dans le cas de Nino, en particulier dans l'extrait « Respiration et pain au chocolat » au cours duquel les élèves doivent identifier l'origine biologique du glucose, considéré comme réactif de la respiration animale. Tandis que Nino interprète ce phénomène biologique comme une réaction de combustion, il fait mention du pain au chocolat du petit-déjeuner pour orienter les élèves vers la mise en relation de l'alimentation et de la respiration. À ce moment de l'extrait, les différents modèles biologiques et chimiques sont juxtaposés plutôt qu'articulés et le pain au chocolat issu du registre quotidien ajoute de l'incertitude à un milieu déjà mal structuré.

L'étude du cas de Nino conforte l'utilité du critère I3 pour caractériser le potentiel codisciplinaire d'une séance d'enseignement. En particulier parce que les entretiens *post*-observations avec ses élèves<sup>100</sup> tendent à montrer leur faible compréhension du problème complexe traité. Toutefois, les cas de Gauthier et d'Aurélié montrent un ensemble de moments au cours desquels différents registres et mondes cohabitent sans perturber la structuration du milieu. Nous observons en particulier des indices dans le discours qui permettent aux sujets du système didactique de s'orienter dans le milieu et même de demander ou de confirmer dans quel registre se situent les attentes<sup>101</sup>. C'est pourquoi l'indicateur de codisciplinarité I3 ne semble pas un critère réhibitoire pour la mise en œuvre de la codisciplinarité. Sa définition demande une étude fine des interactions des sujets en situation qui contribuent à la co-construction du milieu.

---

<sup>100</sup> Nonobstant les conditions particulières dans lesquelles ces entretiens ont été mis en œuvre (cf. 10.2.2.2).

<sup>101</sup> Martine Jaubert parle d'une « hétéroglossie » au sein de la classe de science. Pour cette autrice, la cohabitation des différents types de discours dans la situation d'enseignement-apprentissage est indispensable à la collaboration des sujets dans l'élaboration du savoir scientifique (Jaubert & Rebière, 2000).

### 11.3 La codisciplinarité au service de l'étude d'un problème complexe : un parcours d'obstacles

#### 11.3.1 Retour réflexif sur la méthodologie de la greffe

##### *11.3.1.1 Effets sur les pratiques d'enseignement*

En proposant à des enseignants et des enseignantes de physique-chimie d'utiliser le cycle du carbone pour enseigner le modèle de la réaction chimique, nous provoquons l'implantation d'une « greffe » dans le système didactique, selon la démarche clinique/expérimentale du didactique ordinaire préconisée par Schubauer-Leoni et Leutenegger (2002), c'est-à-dire l'introduction d'un corps étranger dans le système. Pour ces autrices, la méthodologie de la greffe fait fonction de levier expérimental au service de l'étude du système didactique. Elles considèrent que la perturbation provoque des adaptations des pratiques, dévoilant les logiques qui les sous-tendent.

Dans le cadre de notre étude, l'insertion du cycle du carbone en classe de chimie, objet traditionnellement enseigné en SVT en France, biologie et géographie en Suisse romande, poursuit dans un premier temps cet objectif d'étude des pratiques ordinaires. Il s'agit en particulier de comprendre si l'enseignement de la chimie au secondaire I peut contribuer à la compréhension du réchauffement climatique tel que le PER/programme le prévoit. Pour répondre à cette question, nous étudions les conditions d'assimilation ou de rejet de la greffe, en tant qu'indicateurs des objectifs d'enseignement-apprentissage assignés au cours de chimie du cycle 3/cycle 4 par quatre sujets enseignants.

Nos résultats aux échelles macro et méso montrent clairement en phase 2, l'apparition d'un problème environnemental dans les séquences d'Aurélié, Henri et Nino, ainsi que son développement dans les séquences de Gauthier<sup>102</sup>. À ce niveau d'analyse, la greffe a « pris » et il apparaît que l'étude d'un problème complexe relatif à l'environnement est un des objectifs de la séquence concernant les transformations chimiques de la matière. Le cycle du carbone revêt alors une deuxième fonction en devenant porteur de codisciplinarité. Sous cet angle, l'objet « cycle du carbone » n'est alors plus seulement considéré dans sa fonction de greffe comme révélateur du fonctionnement ordinaire du système, mais il contribue au développement du système vers l'étude d'un problème complexe — et donc potentiellement au développement des pratiques d'enseignement physique-chimie. En effet, étudié dans le cadre de l'enseignement du modèle de la réaction chimique, le cycle du carbone offre les conditions pour mobiliser ce concept spécifique au service d'un enjeu de formation citoyenne : la compréhension de l'origine anthropique du réchauffement climatique. La première partie de notre étude, basée sur une enquête par questionnaire, montre que ces enjeux de formation ne sont pas évidents pour un certain nombre d'enseignants et d'enseignantes de physique-chimie (cf. 3.2.3). Ce constat est confirmé par notre étude des pratiques ordinaires, qui montre une focalisation sur l'enseignement des savoirs disciplinaires dans trois de nos quatre études de cas. Le dispositif que nous proposons pourrait donc constituer un support pour le développement des pratiques d'enseignement à travers sa fonction d'objet-relais permettant une approche codisciplinaire favorable à l'étude de la complexité.

Cependant, c'est précisément le caractère codisciplinaire de l'objet qui semble constituer une difficulté au moment de son enseignement. Par exemple, au cours de la phase 2 chez Nino, le cycle du carbone constitue un élément de contextualisation de différentes réactions de combustion qui sont modélisées au niveau microscopique (photosynthèse, respirations animale et végétale). Mais alors que l'enjeu semble

---

<sup>102</sup> L'objectif d'étudier différents problèmes environnementaux étant déjà présent dans les pratiques ordinaires de Gauthier étudiées en phase 1.

orienté vers l'écriture et l'équilibre d'équations de réactions chimiques, Nino propose une conclusion en termes de production/consommation d'énergie. Cette interprétation des flèches du cycle du carbone relève d'une vision exclusivement biologique des phénomènes et contraint fortement l'étude du problème complexe — l'origine anthropique du dioxyde de carbone atmosphérique. La diminution de la complexité provoquée par glissement dans le domaine de la biologie de Nino le conduit à conclure la séquence par une analogie incohérente du point de vue du cycle carbone, entre l'énergie nécessaire à la vie et l'énergie produite par les systèmes de production capitalistes des sociétés industrielles (au sens de Lévi-Strauss, 2011) (Extrait 33).

Ens: l'idée comme pour votre organisme c'est ce besoin tu l'as dit El? c'est ce besoin d'énergie, si on n'a pas d'énergie on n'est pas bien, si vous n'avez pas d'énergie vous n'êtes pas bien, d'accord jusqu'à la mort ok, donc on dépend de notre de notre énergie en fait l'idée ce serait de produire de l'énergie sans toucher à ce cycle-là ou en limitant cet apport-là vous voyez l'idée ou pas y'a d'autres façons de produire de l'énergie / ok,

*Extrait 33: Nino phase 2 — séance 3 [01 : 04 : 07 à 01 : 04 : 43]*

Le problème de l'analogie employée par Nino, c'est qu'elle confond besoin vital d'énergie pour les organismes et besoin économique d'énergie pour les sociétés industrielles. Dès lors, l'hypothèse d'absence d'énergie conduit Nino à comparer la mort des êtres vivants avec l'effondrement des systèmes capitalistes, phénomènes incommensurables à de multiples niveaux, en premier lieu du point de vue de la biologie. En lisant cet extrait à la lumière des précédents, nous comprenons que l'enseignant tente à tout prix de reconnecter l'interprétation biologique des transformations chimiques qu'il vient de proposer et la conclusion à propos de l'origine anthropique du réchauffement climatique introduite par le cycle du carbone. Le concept d'énergie devient alors le pivot de son raisonnement et lui permet un artifice nécessaire pour mettre en relation des savoirs disciplinaires qui n'ont aucun lien du point de vue du problème complexe étudié. Nous supposons aussi une possible interprétation du terme « énergie » dans le sens courant, synonyme de « vitalité physique » (« Energie », s. d.), qui expliquerait la phrase « si on n'a pas d'énergie on n'est pas bien ». Cette deuxième explication est tout aussi révélatrice de la confusion présente dans le milieu au cours de cet extrait.

Le cas de Nino nous semble particulièrement important pour discuter le caractère étranger du cycle du carbone au système « classe de chimie ». De toute évidence, la formation initiale de Nino majoritairement en biologie oriente sa lecture du cycle du carbone vers une interprétation biologique des phénomènes représentés. Par conséquent, l'étude du problème complexe dans le cadre du cours de chimie de Nino n'atteint pas les objectifs relatifs à la codisciplinarité. Ainsi, nous formulons des réserves quant à la compréhension des élèves de l'origine du réchauffement climatique à la fin de cette séquence. Il est probable que Nino n'ait pas identifié le rôle du modèle de la réaction chimique pour mettre en évidence la conservation de l'élément carbone au sein du cycle du carbone, et sa nécessité pour démontrer le rôle des activités industrielles dans l'accumulation de dioxyde de carbone dans l'atmosphère. C'est pourquoi nous considérons l'identification des caractéristiques épistémologiques des modèles impliqués dans le problème complexe par l'enseignant ou l'enseignante comme l'une des composantes importantes pour la mise en œuvre de la codisciplinarité. Cette composante intervient en particulier au moment de la préparation de la séquence. Elle influence les choix de transposition des savoirs en regard des enjeux d'enseignement-apprentissage identifiés.

Ces réflexions à propos du savoir apparaissent comme des conditions de mise en œuvre de la codisciplinarité. Toutefois, elles ne peuvent être considérées comme l'unique levier du développement professionnel. En effet, la revue de littérature conduite par Crahay (1989) met en évidence l'ensemble des contraintes qui s'opposent aux changements des pratiques d'enseignement. Parmi ces contraintes, citons l'influence de l'histoire de l'enseignement, les exemples de pratiques que les sujets ont pu observer dans leur expérience personnelle de la classe, les prescriptions des curricula, les attentes sociales, les contraintes institutionnelles, les rapports de pouvoirs entre sujets, etc. L'évolution des pratiques d'enseignement de la chimie vers la contribution à la compréhension des enjeux environnementaux ne peut donc seulement se fonder sur une formation du corps enseignant aux caractéristiques épistémologiques des savoirs concernés.

Lorsque les caractéristiques importantes des savoirs sont identifiées et présentées dans le milieu, la mise en œuvre de la codisciplinarité en classe de chimie dépend notamment de la construction du problème et du statut accordé à la modélisation. En effet, avant de mobiliser les savoirs disponibles dans le milieu, les élèves doivent identifier à quel problème répondre (Fabre, 2011). De même que le rôle des différents modèles disciplinaires (cycle du carbone, réaction chimique, effet de serre) pour comprendre et interpréter un phénomène global tel que le réchauffement climatique doit être mis en évidence.

Les pratiques analysées dans nos quatre études de cas montrent des difficultés liées à ces deux dimensions de l'enseignement des sciences. Chez Henri et Nino par exemple, le problème environnemental n'est jamais clairement formulé et les élèves ne participent pas directement à son élaboration. De même que le rôle du modèle de la réaction chimique pour interpréter les phénomènes impliqués dans le cycle du carbone n'est pas toujours explicite, en particulier chez Aurélie et Henri.

En outre, nous identifions l'effet du temps sur la prise en main de l'objet-relais. Il est possible que dans cette première mise en œuvre de la séquence sur les transformations chimiques intégrant le cycle du carbone, les enseignants et l'enseignante se confrontent à la nouveauté de l'objet, caractéristique qui en fait à la fois un excellent candidat à la greffe et un vecteur potentiel de développement professionnel. Dans les faits, nous observons un écart important entre les pratiques ordinaires d'enseignement de la chimie et ce que suppose l'intégration de la greffe. Nous serions tentée de dire qu'une nouvelle itération de la phase expérimentale (phase 2) tendrait à diminuer ce facteur « nouveauté », en provoquant de nouvelles intégrations de cet objet dans le cadre des enseignements de chimie, initiatrices de réflexions sur son potentiel didactique.

Cette dernière remarque soulève la question de l'accompagnement des sujets enseignants dans la mise en œuvre de la séquence. Pour discuter cette dimension, revenons au cas de Nino. Avant la mise en œuvre de la séquence en phase 2, nous avons consacré près de deux heures et demie d'accompagnement à cet enseignant au cours de deux entretiens. Ces entretiens ont été l'occasion de discuter de l'insertion du cycle du carbone dans sa séquence ordinaire en fonction des enjeux d'enseignement-apprentissage qu'il identifiait. À sa demande, nous avons aussi suggéré des ressources documentaires pour soutenir l'articulation des modèles disciplinaires au service de la compréhension de l'origine anthropique du réchauffement climatique. Dans nos échanges, il est souvent question de l'interprétation des flèches du cycle du carbone comme des réactions chimiques et des effets observés sur l'accumulation du dioxyde de carbone dans l'atmosphère.

Les analyses des extraits significatifs montrent que ces caractéristiques importantes des savoirs disparaissent dans sa pratique, au moment de la présentation du cycle du carbone aux élèves. Nous nous

interrogeons sur le poids de l'épistémologie professionnelle de Nino (au sens de Ligozat, 2011) (cf. 5.6.2), qui enseigne le cycle du carbone dans le cadre des enseignements de biologie, en parallèle de la physique-chimie depuis dix-huit ans, sur ce résultat, mais aussi sur l'influence de son rapport à la discipline scolaire « chimie ». Auquel cas, nous identifions un levier pour une formation initiale des enseignantes et des enseignants de physique-chimie et de SVT/biologie/géologie.

À l'instar de l'approche développée dans la greffe, la formation pourrait proposer une approche codisciplinaire du cycle du carbone. Nous pourrions imaginer un premier temps de lecture disciplinaire de ce modèle, puis un temps de mise en commun pour mettre en perspective les savoirs biologiques, géologiques et chimiques mis en jeu, mais aussi les similitudes et les différences identifiées par le regard croisé des disciplines scientifiques. L'enjeu serait orienté vers la mise en évidence de la nécessaire articulation des modèles scientifiques pour comprendre le problème environnemental soulevé par le cycle du carbone, en particulier la réaction chimique, le principe de conservation de la matière et l'effet de serre. Aussi, un travail pourrait être fait à propos des échelles de modélisation du réel, que nous savons parfois discordantes entre la chimie et la biologie<sup>103</sup>. La dimension des échelles de temps discutée dans le chapitre 4 pourrait également constituer un point de rencontre entre chimistes et géologues.

En considérant la stabilité des pratiques d'enseignement décrite par Crahay (1989), nous restons modeste vis-à-vis d'un potentiel de développement codisciplinaire des pratiques à travers une telle formation. Toutefois, nous pensons qu'elle pourrait contribuer à davantage de continuité entre les disciplines scolaires, notamment à travers une lecture éclairée du PER/programme qui permettrait une programmation cohérente des contenus au sein des différentes disciplines. Cette formation initiale qui propose une lecture croisée d'un objet complexe tel que le cycle du carbone se profile comme une niche pour la didactique comparée dans les parcours de formation, en France comme en Suisse romande.

#### *11.3.1.2 Effets sur les apprentissages*

Par ailleurs, la discussion de la méthodologie de la greffe soulève la question de l'accompagnement des élèves dans un dispositif dans lequel l'enseignant ou l'enseignante dispose d'une grande autonomie. Nous rappelons que cette méthodologie consiste à suggérer une représentation du cycle du carbone au sujet enseignant et à le laisser libre de l'introduire dans sa séquence sur les transformations chimiques comme il le souhaite. Les pratiques observées en phase 2 sont alors le produit de l'expression du rapport des enseignantes et des enseignants aux objets de savoir, des enjeux d'enseignement-apprentissage associés à ces savoirs qu'ils ont identifiés dans les prescriptions officielles<sup>104</sup> et de leur épistémologie pratique.

Aussi, nous observons, dans la structure des quatre séquences, des motifs propres à l'enseignement des sciences au secondaire. Dans le canton de Genève, ces motifs reprennent la structure des Moyens d'enseignement romands de sciences tels que conçus par l'équipe de Guy Robardet au début des années deux mille dix. Ils consistent tout d'abord en la mise en œuvre d'une activité expérimentale, qui est ensuite interprétée au niveau macroscopique puis au niveau microscopique du modèle. Chaque motif aboutit à la rédaction et à l'équilibre de l'équation de réaction chimique correspondante. Dans les faits,

---

<sup>103</sup> La biologie considère le « microscopique » dans son sens littéral, c'est-à-dire comme ce qui est visible au microscope, tandis qu'en chimie le niveau microscopique du modèle fait référence aux atomes et aux molécules, concepts abstraits (cf. 2.2). Sans explicitation, ces différences de dénominations peuvent induire des problèmes de communication entre ces deux communautés.

<sup>104</sup> Nous rapprochons l'interprétation des prescriptions officielles de la catégorisation des déterminants de l'action enseignante en termes de « préconstruits épistémologiques et pédagogiques » (Ligozat, 2011) (cf. 5.6.2).

les classes de 11<sup>e</sup> LS que nous avons observées sont de petits effectifs (moins de vingt élèves) et les différentes étapes que nous venons d'exposer sont réalisées en collectif, sur un mode « cours dialogué » (Hersant, 2004). Cette stratégie d'enseignement conduit à une diminution de la part de responsabilité des élèves dans la co-construction du savoir, notamment par un manque de réels moments de dévolution. Nous faisons le même constat pour les classes françaises. Dans ce contexte, certaines tâches relatives à des compétences expérimentales ou à l'étude de documents peuvent être confiées aux élèves, mais la modalité « cours dialogué » des moments de synthèse collective les prive de réelles prises de responsabilité dans l'élaboration du savoir.

Dans ces deux contextes, nous observons une persistance du cours dialogué en phase 2, en particulier dans les moments relatifs à l'étude du problème complexe. Vraisemblablement, ces constats sont le fruit de l'expression de l'épistémologie professionnelle des enseignants et de l'enseignante de physique-chimie. La méthodologie de la greffe nous donne accès à ce déterminant de la pratique en perturbant son fonctionnement ordinaire. Cependant, nous nous interrogeons sur les effets d'un tel enseignement sur la mise en œuvre de la codisciplinarité — portée par la dimension « objet-relais » du cycle du carbone —, en particulier pour l'entrée des élèves dans la compréhension du problème complexe.

En effet, les résultats issus des entretiens *post*-observations menés avec les élèves mettent en évidence un écart au niveau des apprentissages. Les élèves qui réussissent le mieux dans les classes d'Aurélie, Gauthier et Henri sont capables de mobiliser le modèle de la réaction chimique et le principe de conservation de la matière pour expliquer l'origine anthropique de l'accumulation du dioxyde de carbone dans l'atmosphère, quand les élèves en difficulté peinent à mettre en relation les différents modèles. Dans la classe de Nino, en revanche nous ne retrouvons pas le cycle du carbone lorsque nous invitons les élèves à faire un bilan des savoirs rencontrés dans la séance (au sens de Charlot, 1999). Ces résultats interrogent les enjeux de formation associés aux disciplines scientifiques scolaires. Si la formation des chimistes de demain semble un enjeu largement pris en charge par ces enseignements du secondaire I, la formation citoyenne apparaît comme un enjeu de second plan, à la fois vis-à-vis du temps consacré à l'étude du problème environnemental par Aurélie, Gauthier, Henri et Nino, mais aussi vis-à-vis de la priorité portée sur les savoirs spécifiques dans la structure de leurs séquences. Cette dernière remarque s'exprime à deux niveaux.

Tout d'abord, la stratégie d'enseignement de type « cours dialogué » ne permet pas à l'ensemble des élèves d'accéder aux savoirs en cours de construction. De plus, dans certains cas où les élèves en difficulté ont acquis le modèle de la réaction chimique, elles et ils ne sont pas toujours capables de le remobiliser dans des situations trop différentes de celles rencontrées dans le cadre du cours de chimie. Cet obstacle au processus de décontextualisation-recontextualisation (Arsac, 1996) peut être un frein pour l'étude du problème du réchauffement climatique, dont la nature complexe suppose précisément de mobiliser des modèles issus de matrices disciplinaires distinctes<sup>105</sup> (cf. 4.3).

L'approche codisciplinaire que nous développons dans ce travail, en appui sur la définition de Chevallard (2004) et les travaux d'Otero et al. (2016) propose une entrée dans la complexité depuis les disciplines scolaires, à travers l'étude de la transposition des savoirs. Néanmoins, les difficultés rencontrées par des élèves au moment de mobiliser les modèles disciplinaires au service de la complexité

---

<sup>105</sup> C'est la critique que Schneuwly (2016) formule à l'encontre de l'injonction de l'interdisciplinarité à l'école. Du point de vue de cet auteur, cette démarche brouille les cadres des matrices disciplinaires et fait disparaître les épistémologies de chacune.

attirent notre attention sur l'étape de décontextualisation-recontextualisation inhérente au processus transpositif. Cette remarque ouvre un axe de réflexion à propos de la relation des disciplines scolaires aux problèmes complexes. En particulier, comment le problème complexe est-il introduit dans une séquence majoritairement centrée sur l'enseignement-apprentissage d'un modèle spécifique ? Dans les quatre cas que nous étudions, le cycle du carbone fait dans un premier temps fonction de contextualisation de différentes transformations chimiques, modélisées comme des réactions chimiques. Ainsi, il est possible que la dimension codisciplinaire de l'objet échappe aux élèves dans ce premier moment de contact dans le cadre de la classe de chimie. Sous l'effet du cloisonnement des disciplines, le cycle du carbone pourrait être considéré dans le cadre du cours de chimie comme un cycle de réactions chimiques impliquant le carbone, et dans le cours de SVT/biologie/géologie, comme le support pour penser l'origine anthropique du réchauffement climatique. D'autant plus que dans les cas d'Aurélie, Henri et Nino, le problème environnemental n'est pas explicitement introduit dans le milieu et que les élèves sont encore moins responsables de son élaboration.

Les difficultés dont nous venons de discuter ne sont pas sans lien avec l'ensemble des contraintes institutionnelles qui pèsent sur le système didactique « classe de chimie ». Nous allons maintenant les présenter.

### 11.3.2 Contraintes institutionnelles

Une dimension inattendue des résultats de nos quatre études de cas réside dans l'apparente similarité des pratiques enseignantes observées dans deux contextes institutionnels distincts : la France et le canton de Genève en Suisse. Notre étude des curricula de ces deux contextes rend compte de similarités dans les prescriptions concernant l'enseignement-apprentissage des transformations chimiques au début du secondaire, jusqu'au niveau auquel ces phénomènes sont introduits (4<sup>e</sup> en France, élèves de 13-14 ans ; 11<sup>e</sup> en Suisse romande, élèves de 14-15 ans) (cf. 3.1.2.3). Cependant, les différences structurelles de ces deux contextes d'enseignement pouvaient nous laisser supposer des différences significatives dans l'observation des pratiques effectives, en particulier dans la phase de mise en œuvre de la greffe (phase 2). Pourtant, dans le discours des sujets enseignants, nous percevons l'importance accordée à l'équation de réaction chimique et au langage de la chimie<sup>106</sup>. Dans le canton de Genève, Nino nous expose explicitement son intention d'apporter le socle de connaissances nécessaire aux élèves qui poursuivront la chimie au collège (secondaire II). Le statut même de la discipline scolaire « chimie » est discuté dans ce contexte, son enseignement se limitant à la séquence sur les transformations chimiques au cycle d'orientation (secondaire I) — celle que nous observons — dispensée dans le cadre des enseignements de physique aux classes « Littéraire-scientifique » (LS), c'est-à-dire à une section seulement sur les trois possibles en 11<sup>e</sup> année. Les élèves de la section LS sont les plus susceptibles de s'orienter vers l'enseignement général à l'issue du cycle d'orientation, c'est pourquoi Nino est soucieux de leur transmettre les savoirs indispensables à leur formation future. D'autant plus que les enseignements scientifiques du collège préparent les élèves à un cursus universitaire et présentent donc un niveau conceptuel significativement plus élevé que les enseignements au secondaire I. Il est alors possible que le langage de la chimie doive constituer un seuil de connaissances minimal pour appréhender ces enseignements.

---

<sup>106</sup> Nous désignons par cette expression l'appropriation des différents systèmes de représentation des espèces chimiques, des atomes et des molécules (symboles, formules chimiques, billes de couleurs, etc.).

En France, l'enjeu du « socle de connaissance » répond aux exigences du diplôme national du brevet (DNB), examen national qui évalue les apprentissages des élèves de 3<sup>e</sup> et marque la fin du secondaire I. Ainsi, Aurélie et Gauthier nous rapportent à plusieurs moments proposer des tâches qui permettent aux élèves de se préparer au mieux à l'examen. Ces tâches consistent notamment à mettre en correspondance plusieurs représentations d'une même réaction ou à équilibrer des équations de réactions chimiques.

Nous nous interrogeons sur le sens d'évaluer ce type de tâche dans le cadre du DNB, dans la mesure où le programme de chimie de cycle 4 insiste sur la modélisation des phénomènes. De notre point de vue, la maîtrise des différents registres de représentations qui constituent le langage de la chimie relève plutôt d'un apprentissage de type « par cœur » qui ne permet pas directement d'accéder aux capacités de modélisation des élèves. De même que l'équilibre d'une équation de réaction peut tout à fait consister en un exercice « comptable » d'ajustement de coefficients sans impliquer l'utilisation du principe de conservation de la matière (Dehon & Snauwaert, 2015; Laugier & Dumon, 2004). Enfin, dans nos précédents travaux, nous avons montré une décorrélation entre la maîtrise du langage de la chimie — impliquant les équations de réactions chimiques — et le niveau de conceptualisation des élèves (Sudriès, 2019). Le type de tâche proposée aux élèves au DNB paraissent non seulement en rupture avec les savoirs au programme, mais aussi incohérentes d'un point de vue épistémologique.

### 11.3.3 Considérations épistémologiques

#### *11.3.3.1 Ruptures et incohérences*

Sur le plan épistémologique, en effet, les enseignements de la chimie au cycle d'orientation dans le canton de Genève, comme au collège en France, suggèrent une interprétation microscopique de l'équation de réaction. Ainsi, nous avons observé dans nos quatre études de cas des situations où les formules des espèces chimiques sont remplacées par les modèles moléculaires — les billes de couleurs ou les briques de Lego® — afin de représenter la modification des molécules et la conservation des atomes au cours de la réaction chimique. Cette interprétation entre en contradiction avec l'histoire du concept, qui, rappelons-le, émerge de l'étude des proportions de substances réactives et produites dans les travaux d'Antoine Lavoisier (Canac, 2017). De plus, l'interprétation microscopique de l'équation de réaction provoque une rupture épistémologique entre le secondaire I et le secondaire II, niveau où la quantité de matière est introduite. Face à ces constats, nous ne parvenons pas à justifier ce choix de transposition par des arguments épistémologiques ou didactiques. Nous estimons toutefois qu'il s'agit de dimensions du savoir faciles à évaluer dans le cadre d'un examen national qui concerne près de huit cent cinquante mille élèves (Ministère de l'Éducation nationale et de la jeunesse, 2023). Cette considération pratique pourrait être à l'origine de la présence de ces types de tâches aux DNB.

Aussi, cette aberration du programme au cycle 4 peut fortement contraindre les pratiques d'enseignement. Sans cohérence épistémologique, la nécessité du savoir s'avère difficile à appréhender et se transforme en un exercice de contextualisation des plus artificiels. Les enseignements sont alors orientés par la demande institutionnelle : préparer les élèves aux tâches évaluées dans le cadre du DNB. Ceci apparaît de façon explicite dans les entretiens menés avec Gauthier. Plusieurs fois, il justifie la structure d'une séance par l'importance de répondre aux enjeux du DNB. Dans sa séquence se distinguent alors deux types de tâches : celles qui préparent spécifiquement les élèves à l'examen national et celles qui permettent la formation citoyenne à travers notamment l'étude du réchauffement climatique. Dès lors, les concepts d'atomes et de molécule ne trouvent de sens qu'à travers

l'épistémologie de la discipline scolaire « chimie », science expérimentale qui modélise les transformations de la matière à un niveau de savoir microscopique par tradition.

### *11.3.3.2 Quelques pistes d'améliorations*

Pour contourner l'ensemble de ces ruptures épistémologiques, nous nous questionnons sur le potentiel d'une entrée dans l'enseignement de la chimie par la notion de substance, à l'instar de Kermen et Canac (2021). La caractérisation des substances pourrait être appréhendée avant le modèle de la réaction chimique à travers l'observation des transformations physiques de la matière (les changements d'état de l'eau par exemple). Les paramètres de définition d'une substance pourraient alors être construits avec les élèves sur la base de leurs propriétés physiques (masse volumique, point de fusion, etc.). Les transformations chimiques de la matière pourraient alors être introduites à travers une activité expérimentale sur la base de ces critères. Une telle expérience conduisant à la formation d'une nouvelle substance créerait la nécessité d'un nouveau savoir pour modéliser le phénomène observé. Par exemple, l'expérience d'électrolyse de l'eau présente dans le PER permet une modélisation macroscopique de la transformation de l'eau liquide en deux gaz produits en des volumes distincts. Ces gaz peuvent être caractérisés par des tests d'identification spécifiques (test de la bûchette incandescente pour le dioxygène et test de la combustion explosive pour le dihydrogène).

Avec cette entrée macroscopique dans la modélisation, la dualité macroscopique-microscopique de l'équation de réaction chimique pourrait être contournée dans un premier temps. Puis, une première approche macroscopique de l'équation de réaction chimique permettrait aux élèves de se saisir de la dimension prédictive du modèle à propos des proportions de produits formés, en l'absence du concept de quantité de matière. Dans l'analyse de l'extrait « l'électrolyse de l'eau » chez Nino, nous avons observé les difficultés d'une élève à prédire les proportions de produits de la réaction à partir des modèles moléculaires physiques présentés sur la table (les molécules sont représentées par des assemblages de briques de Lego®). Nous comprenons que la lecture microscopique de l'équation de réaction empêche cette élève d'envisager l'infinité de molécules de réactifs disponibles pour former autant de molécules de produits. Dans le cas de réactions telles que l'électrolyse de l'eau, une entrée directement macroscopique dans la modélisation pourrait favoriser l'anticipation des produits de la réaction et de leurs proportions à travers la caractérisation expérimentale des substances. Néanmoins, ce raisonnement exclusivement macroscopique s'appuie sur le cas des gaz considérés parfaits. Le cas particulier de l'électrolyse de l'eau nous offre une introduction pour le modèle de la réaction chimique plutôt accessible expérimentalement. Mais cette approche quantitative macroscopique trouve des limites lorsqu'il s'agit d'interpréter des transformations de liquides ou de solides. C'est pourquoi nous envisageons cette démarche comme une première approche du modèle, qui demandera d'être étendue par la suite.

Enfin, l'interprétation du principe de conservation de la masse par celui des atomes pourrait introduire la modélisation au niveau microscopique. Le raisonnement pourrait s'appuyer sur la caractérisation des substances évoquées précédemment, sur le constat que les substances obtenues sont différentes, tandis que leur masse totale est égale à la masse totale des réactifs. De cette apparente contradiction naît l'idée que quelque chose est conservé. L'introduction des concepts d'atome et de molécule est alors possible, en appui sur le constat des proportions relatives.

Du point de vue du cycle du carbone, la modélisation macroscopique suffit pour interpréter les transformations de la matière provoquées par les phénomènes biologiques, géologiques et industriels,

mais le modèle microscopique est nécessaire pour comprendre l'origine de l'élément carbone stocké sous forme de gaz à effet de serre dans l'atmosphère. Ainsi, son étude pourrait intervenir dans la continuité de la séquence de chimie que nous venons de décrire.

#### 11.4 Une double approche didactique de la chimie/didactique comparée

Enfin, nous annonçons en introduction adopter une double approche didactique de la chimie/didactique comparée. L'articulation de ces deux approches s'exprime notamment dans la méthodologie de notre étude. En effet, le modèle de l'action didactique conjointe nous fournit un ensemble d'outils utiles pour une analyse fine de la relation contrat didactique-milieu — le triplet de genèses. L'étude ascendante de la transposition didactique implique aussi une analyse épistémologique des savoirs en jeu. La didactique de la chimie intervient à ce niveau de notre méthodologie.

Par ailleurs, la mise en perspective de pratiques d'enseignements se déployant dans deux contextes institutionnels différents — la Suisse romande et la France — permet de rendre visible des déterminants de l'action spécifique qui pourraient être naturalisés. Nous pensons en particulier à l'orientation de l'enseignement de la chimie vers la transmission de savoirs disciplinaires pour répondre aux enjeux de l'orientation des élèves en fin de 11<sup>e</sup> LS dans le canton de Genève et à la préparation du DNB en France. De même que l'étude comparée des curricula de ces deux contextes met en évidence le fort enjeu associé aux problèmes environnementaux dans l'enseignement des sciences, sans que des moyens de mise en œuvre explicites soient indiqués.

Aussi, la didactique comparée permet le développement d'une approche codisciplinaire de ce type de problème à l'école. La mise en perspective des disciplines dans l'étude d'un objet tel que le cycle du carbone permet de faire émerger les composantes génériques et spécifiques nécessaires à son étude. La codisciplinarité telle que développée dans notre travail offre une forme de collaboration des disciplines scolaires, en partant de la transposition des savoirs qu'elles prennent en charge. La didactique comparée pourrait donc contribuer à la formation à un enseignement codisciplinaire des problèmes environnementaux.

#### 11.5 Conclusion du chapitre

Nos résultats montrent, d'une part l'insertion du cycle du carbone dans quatre séquences à propos du modèle de la réaction chimique, d'autre part des effets nuancés sur la compréhension des élèves d'un problème environnemental — le réchauffement climatique.

Nous identifions un ensemble de contraintes à tous les niveaux de la transposition didactique qui contribuent à expliquer les difficultés dans la mise en œuvre effective d'un enseignement codisciplinaire en classe de chimie, malgré l'identification dans les différentes situations des conditions nécessaires à cette codisciplinarité. Parmi ces faisceaux d'explications, les incohérences épistémologiques et didactiques des prescriptions officielles des savoirs de chimie au secondaire I, en Suisse romande et en France, semblent particulièrement prégnantes. Ces constats ouvrent des pistes de réflexion pour l'amélioration de l'enseignement de la chimie au début du secondaire auquel la didactique comparée pourrait contribuer en proposant une formation codisciplinaire des enseignantes et enseignants de sciences

## CHAPITRE 12 — CONCLUSION ET OUVERTURE

Au début de ce travail, nous nous questionnions sur les modalités de contribution de la discipline scolaire « chimie » à la fonction d'éducation confiée à l'École, notamment à travers l'élaboration de la culture scientifique et technique des élèves, nécessaire à l'exercice de leur citoyenneté.

D'une part, nous avons mis en évidence dans les chapitres 2 et 4 le rôle du modèle de la réaction chimique, objet central des curricula de chimie en Suisse romande et en France, pour comprendre l'origine anthropique du réchauffement climatique.

D'autre part, notre exploration de la littérature internationale relève un ensemble de préconisations issues de la recherche pour l'enseignement des problèmes environnementaux en classe de chimie, mais aussi le faible nombre d'études de pratiques ordinaires à ce sujet (cf. Chapitre 3). De façon générale, notre revue de littérature extensive à propos de l'enseignement et de l'apprentissage de la transformation chimique et du modèle de la réaction chimique met en évidence le manque d'études de pratiques ordinaires d'enseignement de la chimie, en particulier dans les contextes francophones (cf. Chapitre 2).

Certaines recommandations, produites notamment par les instances prescriptrices internationales et relayées par les recherches sur les curricula, mais aussi par les approches interdisciplinaires de l'enseignement, mettent en avant la nécessaire interdisciplinarité au service de l'étude des problèmes complexes tels que le réchauffement climatique. Nous avons montré dans le chapitre 3 qu'un ensemble de critiques sont formulées à l'encontre d'un enseignement interdisciplinaire. En particulier, l'absence de preuves scientifiques de leur efficacité du point de vue des apprentissages des élèves, tant sur le plan des contenus disciplinaires, que celui du développement de compétences utiles à leur formation citoyenne.

Face à ces constats, nous proposons une approche alternative en empruntant à Chevallard (2004) le concept de *codisciplinarité*. Dès lors, notre entrée dans l'étude des processus de transmission du savoir se place au niveau de la transposition didactique dont nous réalisons une étude ascendante. À travers la codisciplinarité, nous formulons l'hypothèse selon laquelle les savoirs disciplinaires sont indispensables à la compréhension d'un problème complexe tel que le réchauffement climatique, et donc que leur enseignement doit être entremêlé — pour reprendre la métaphore d'Edgar Morin présentée en introduction — au sein des matrices disciplinaires.

Du côté des résultats, l'étude des pratiques ordinaires de trois enseignants et une enseignante du canton de Genève (Suisse) et de l'académie de Montpellier (France) montre une absence de prise en charge des problèmes environnementaux chez trois d'entre elles et eux. Un seul enseignant français propose une séquence structurée autour de l'étude de différents problèmes environnementaux à partir de savoirs de physique et de chimie au cours de la phase 1 d'observations. Ces résultats confirment la diversité de pratiques relatives à l'intégration des problèmes environnementaux mise en évidence par notre enquête par questionnaire (cf. 3.2.3).

Aussi, l'année suivante, nous proposons aux mêmes enseignants et enseignantes d'intégrer l'étude du cycle du carbone à leurs séquences ordinaires afin de provoquer l'insertion d'un problème environnemental en classe de chimie. Cet objet occupe une double fonction. Premièrement, traditionnellement enseigné dans les cours de biologie et de géographie en Suisse romande, SVT en

France, il est un corps étranger qui vient perturber le fonctionnement ordinaire du système didactique « classe de chimie » et ainsi favoriser l'étude des pratiques. À ce titre, le cycle du carbone constitue une greffe, au sens de Schubauer-Leoni et Leutenegger (2002). Deuxièmement, le cycle du carbone fait fonction d'objet-relais, c'est-à-dire de lien entre les disciplines scolaires impliquées dans l'étude du réchauffement climatique (cf. 4.3.3). Sous cet angle, le cycle du carbone constitue le support de la codisciplinarité mise en œuvre pour l'étude de ce problème complexe.

Les deux dimensions de l'objet cycle du carbone, levier expérimental (la greffe) et objet-relais, apportent deux axes de résultats. Tout d'abord, aux niveaux d'analyse macroscopique et mésoscopique, les conditions d'un enseignement codisciplinaire du cycle du carbone semblent présentes dans les quatre cas. On observe une prise de la greffe chez chacun et chacune. Cependant, ces résultats sont nuancés par les analyses à l'échelle microscopique, en particulier à travers l'étude de la mise en œuvre de la codisciplinarité au niveau du partage des responsabilités entre les sujets enseignants et apprenants, et aux effets possibles sur les apprentissages. Nous identifions en particulier un défaut de dévolution de la plupart des tâches relatives à l'élaboration du problème complexe ou à son étude à travers la mise en relation des différents modèles disciplinaires impliqués. Ainsi, chez Aurélie, Henri et Nino, le problème n'est jamais explicitement défini, ce qui les conduit à adopter une posture de surplomb au moment de son étude.

De façon générale, bien que ces séquences proposent chacune une lecture du cycle du carbone, les enjeux d'enseignement-apprentissages prioritaires restent centrés sur la transmission de savoirs disciplinaires : le modèle de la réaction chimique et le principe de conservation de la matière. Dans ces deux contextes scolaires pourtant différents sur bien des aspects, nous interprétons la prévalence des savoirs académiques — et donc de la dimension « instruction » de l'enseignement scientifique —, sur l'étude du problème complexe — dimension « éducation » —, à la lumière des contraintes institutionnelles. Dans le canton de Genève, l'enseignement de la chimie intervient à la fin de la scolarité obligatoire (cycle d'orientation) et constitue un enseignement réservé aux élèves qui poursuivront leur scolarité dans le secondaire II. Les enseignants insistent donc sur le rôle de cette séquence pour transmettre un socle de connaissances minimal pour les élèves qui continueront l'étude de la chimie l'année suivante. L'enjeu d'instruction est alors tout à fait explicite dans le rapport que ces enseignants entretiennent à la discipline scolaire « chimie ». Dans le contexte français, si la séquence à propos des transformations chimiques de la matière intervient une année plus tôt qu'en Suisse romande (classe de 4<sup>e</sup>, élèves de 13-14 ans), elle n'est pas moins contrainte par un enjeu fort : la préparation au diplôme national du brevet, examen national qui sanctionne la fin de l'enseignement obligatoire l'année suivante. Les sujets enseignants sont alors pris entre deux logiques inconciliables dans le temps imparti à la chimie au secondaire I : entraîner les élèves à écrire et équilibrer des équations de réactions chimiques dans la perspective de les préparer au brevet et leur transmettre une culture scientifique et technique qui les rend aptes à penser, comprendre et critiquer le monde.

Enfin, nous identifions en particulier chez Henri et Nino des difficultés à saisir la contribution des modèles de la chimie pour l'étude du cycle du carbone. Ces deux enseignants qui exercent dans le canton de Genève nous donnent à voir une mise en œuvre de la codisciplinarité qui bascule dans une matrice disciplinaire au moment de la conclusion. Chez Henri, le cycle du carbone sert finalement d'illustration du principe de conservation de l'élément et la dimension complexe du problème environnemental soulevé par le cycle du carbone est évacuée au profit des savoirs de la chimie. Chez Nino, un défaut de

structuration du milieu au moment l'étude des phénomènes biologiques tels que la photosynthèse ou la respiration animale ne permet pas explicitement la mise en relation des différentes matrices disciplinaires. Nos résultats mettent également en avant l'effet différenciateur que peut provoquer un milieu mal structuré du point de vue des savoirs disciplinaires, en défaveur des élèves en difficulté. Chez Nino, la bascule dans la matrice biologie se confirme au moment de la conclusion, alors que l'enseignant propose un bilan de ces phénomènes en termes de production d'énergie et de bénéfices pour les êtres vivants. Ces deux cas nous amènent à nous interroger sur l'identification par l'enseignante ou l'enseignant des savoirs impliqués dans le problème complexe pour permettre la mise en œuvre de la codisciplinarité, et par ricochet de l'appropriation du problème par les élèves, en particulier les plus faibles.

L'ensemble des études de cas nous permet d'apporter des éléments empiriques à la définition de la codisciplinarité que nous élaborions de façon théorique dans le chapitre 4. Vis-à-vis de nos résultats, en particulier chez Gauthier, la codisciplinarité constitue sans conteste une approche pour introduire l'étude de la complexité en classe de chimie. Son ancrage dans les savoirs scolaires permet la mise en perspective des différentes épistémologies nécessaires à la compréhension d'un problème tel que le réchauffement climatique. Aussi, nos résultats mettent en évidence la nécessité de l'élaboration des différents modèles disciplinaires, afin qu'ils soient disponibles pour les élèves avant l'entrée dans le problème complexe. Ainsi, nous pouvons dire que la mise en œuvre d'un enseignement codisciplinaire opère du spécifique vers le complexe.

Enfin, les résultats de l'étude ascendante de la transposition didactique du modèle de la réaction chimique enseigné au service de la compréhension d'un problème complexe — l'origine anthropique du réchauffement climatique — exposés dans les précédents paragraphes nous conduisent à penser les conditions qu'implique un enseignement codisciplinaire pour chacun des pôles du système didactique (Figure 137). Du point de vue du savoir, les caractéristiques des modèles disciplinaires qui contribuent à la compréhension du problème complexe doivent être présentes dans le milieu, tout comme le problème complexe sur lequel porte la codisciplinarité. Le professeur<sup>107</sup> doit mettre en avant ces caractéristiques, de sorte qu'il puisse accompagner les élèves dans l'aménagement d'un milieu porteur pour l'élaboration du problème et de sa solution. Ainsi, l'élève doit disposer d'un espace de responsabilité lui permettant d'accéder à la co-construction du problème ainsi qu'à sa résolution par la mise en relation des modèles présents dans le milieu.

---

<sup>107</sup> Comme dans le chapitre 5, nous reprenons ici l'expression de Chevallard pour être en cohérence avec le schéma du système didactique. Comprendre « l'enseignant ou l'enseignante ».

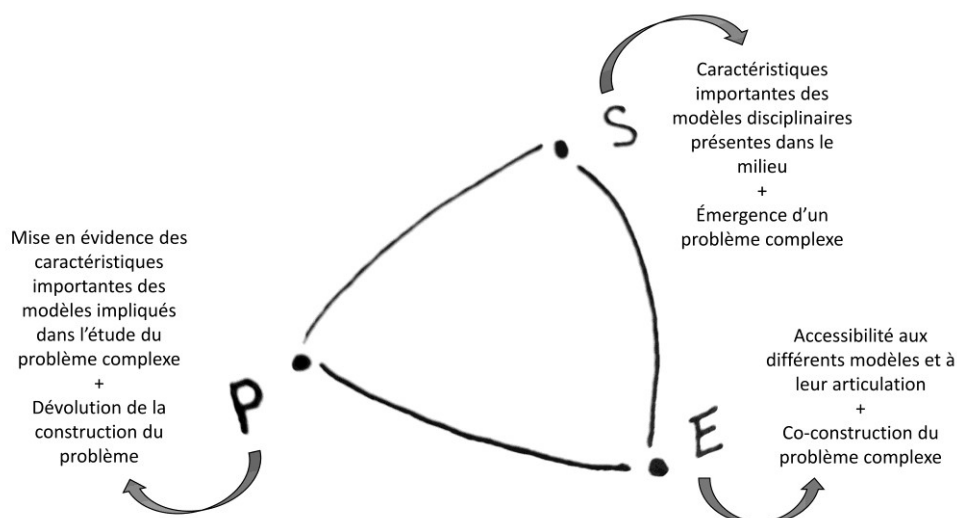


Figure 137 : conditions de mise en œuvre de la codisciplinarité selon les trois pôles du système didactique

En guise d'ouverture, nous rappelons que les difficultés identifiées lors de la mise en œuvre de la codisciplinarité en classe de chimie sont majoritairement dues aux contraintes institutionnelles qui pèsent sur le fonctionnement du système didactique : prescriptions officielles trop elliptiques, manque de temps, multiplicité d'enjeux inconciliables, incohérences épistémologiques, etc. Aussi, si nous identifions dans le chapitre 11 un levier de franchissement de ces obstacles du côté de la formation des enseignantes et enseignants, il nous semble également qu'un travail de mise en cohérence des Plans d'études/programmes scolaires, non seulement sur un plan épistémologique, mais surtout didactique s'impose.

## BIBLIOGRAPHIE

- Abraham, M. R., Williamson, V. M., & Westbrook, S. L. (1994). A cross-age study of the understanding of five chemistry concepts. *Journal of Research in Science Teaching*, 31(2), 147-165. <https://doi.org/10.1002/tea.3660310206>
- Académie française. (2019). *La féminisation des noms de métiers et de fonctions*. [https://www.academie-francaise.fr/sites/academie-francaise.fr/files/rapport\\_feminisation\\_noms\\_de\\_metier\\_et\\_de\\_fonction.pdf](https://www.academie-francaise.fr/sites/academie-francaise.fr/files/rapport_feminisation_noms_de_metier_et_de_fonction.pdf)
- Activité. (2012). In *CNRTL*. <https://www.cnrtl.fr/definition/activit%C3%A9>
- Adams, D. L. (1999). Issues-Directed Chemistry : Teaching Chemical Reactions Using Waste Treatment. *Journal of Chemical Education*, 76(8), 1088-1091. <https://doi.org/10.1021/ed076p1088>
- Ahtee, M., & Varjola, I. (1998). Students' understanding of chemical reaction. *International Journal of Science Education*, 20(3), 305-316. <https://doi.org/10.1080/0950069980200304>
- Akkerman, S. F., & Bakker, A. (2011). Boundary Crossing and Boundary objects. *Review of Educational Research*, 81(2), 132-169.
- Al-Balushi, S. M. (2009). Factors Influencing Pre-Service Science Teachers' Imagination at the Microscopic Level in Chemistry. *International Journal of Science and Mathematics Education*, 7(6), 1089-1110. <https://doi.org/10.1007/s10763-009-9155-1>
- Albe, V. (2005). Un jeu de rôle sur une controverse socio-scientifique actuelle : Une stratégie pour favoriser la problématisation ? *Aster*, 40(1), 67-94. <https://doi.org/10.4267/2042/8856>
- Allaire, J. J. (2021). *Rstudio* (Version version 4.2.1) [Logiciel]. Posit Software PBC. <https://posit.co/>
- Amade-Escot, C. (2019). Epistémologies pratiques et action didactique conjointe du professeur et des élèves. *Education et didactique*, 13(1), 109-114. <https://doi.org/10.4000/educationdidactique.3899>
- Amade-Escot, C., & Venturini, P. (2009). Le milieu didactique : D'une étude empirique en contexte difficile à une réflexion sur le concept. *Education et didactique*, 3(1), 7-44.
- Anastas, P. T., & Warner, J. C. (1998). *Green Chemistry Theory and Practice*. Oxford University.

- Andersson, B. (1986). Pupils' Explanations of Some Aspects of Chemical Reactions. *Science Education*, 70(5), 549-563.
- Andersson, B. (1990). Pupils' Conceptions of Matter and its Transformations (age 12-16). *Studies in Science Education*, 18(1), 53-85. <https://doi.org/10.1080/03057269008559981>
- Andraos, J., & Dicks, A. P. (2012). Green chemistry teaching in higher education : A review of effective practices. *Chemistry Education Research and Practice*, 13(2), 69-79. <https://doi.org/10.1039/C1RP90065J>
- Antidote. (2020, avril 6). Rédaction inclusive. *blogue Antidote*. <https://www.antidote.info/fr/blogue/enquetes/redaction-inclusive>
- Aouad, M. (2014). *Expérimentation assistée par ordinateur : Enjeux et effets didactiques de son utilisation dans l'enseignement de la chimie* [thèse de doctorat]. Université d'Aix-Marseille. <https://www.theses.fr/2014AIXM3073>
- Aouad, M., & Andreucci, C. (2015). Effets de différentes modalités de mise en œuvre d'un TP sur l'apprentissage de la réaction chimique. *Review of Science, Mathematics and ICT Education*, 9(2), 9-24.
- Ardac, D., & Akaygun, S. (2005). Using Static and Dynamic Visuals to Represent Chemical Change at Molecular Level. *International Journal of Science Education*, 27(11), 1269-1298. <https://doi.org/10.1080/09500690500102284>
- Arsac, G. (1996). La transposition didactique en mathématiques. In G. Arsac, M. Develay, & A. Tiberghien (Eds.), *La transposition didactique en mathématiques, en physique, en biologie* (p. 3-36). IREM et LIRDIS de Lyon.
- Arsac, G., Chevallard, Y., Martinand, J.-L., & Tiberghien, A. (1994). *La transposition didactique à l'épreuve*. La pensée sauvage.
- Assude, T., & Mercier, A. (2007). L'action conjointe professeur-élève dans un système didactique orienté vers les mathématiques. In G. Sensevy & A. Mercier (Eds.), *Agir ensemble. L'action didactique conjointe du professeur et des élèves* (p. 153-186). Presses Universitaires de Rennes.

- Aubrecht, K. B. (2018). Teaching relevant climate change topics in undergraduate chemistry courses : Motivations, student misconceptions, and resources. *Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry*, 13, 44-49. <https://doi.org/10.1016/j.cogsc.2018.03.008>
- Aydin, S., Sinha, S., Izci, K., & Volkmann, M. (2014). Turkish, Indian, and American Chemistry Textbooks Use of Inscriptions to Represent ‘Types of Chemical Reactions’. *Eurasia Journal of Mathematics, Science and Technology Education*, 10(5), 383-393. <https://doi.org/10.12973/eurasia.2014.1060a>
- Ayina, B. (2013). *Les concepts élémentaires de la chimie entre la chimie du chimiste et la chimie de l’élève : Proposition de séquences d’enseignement inspirées d’une analyse sémio-épistémologique de l’histoire de la chimie* [thèse de doctorat]. Université de Lyon 1. <https://www.theses.fr/2013LYO10283>
- Ayyildiz, Y., Tarhan, L., & Gil, A. (2023). Comparing the Effectiveness of the Learning Material and the Learning Method in Students’ Achievement in Chemistry Lesson on Chemical Changes. *Research in Science & Technological Education*, 41(4), 1372-1393. <https://doi.org/10.1080/02635143.2022.2086535>
- Azamjonovich, I. S. (2021). The Importance of Using Chemical Transformation by Future Chemistry Teachers. *International Journal on Integrated Education*, 4(3), 240-244. <https://doi.org/10.31149/ijie.v4i3.1393>
- Azan, J.-L. (2017). *Physique Chimie cycle 4 5e, 4e, 3e*. Nathan.
- Baca, L., Onofre, M., & Paixão, F. (2014). Teacher Didactic Content Knowledge and its relation with the utilization of practical activities in chemistry classes : A study with expert teachers of the Angolan educational system. *Investigações Em Ensino de Ciências*, 19(1), 29-54.
- Baker, V. (1994). *A longitudinal study of 16—18 year old students’ understanding of basic chemical ideas*. [thèse de doctorat]. University of York. <https://etheses.whiterose.ac.uk/13999/>
- Baker, V. (2000). *Beyond Appearances : Students’ misconceptions about basic chemical ideas* [Report for the Royal Society of Chemistry]. <http://www.chemsoc.org/networks/learnnet/miscon.htm>

- Barker, V., & Millar, R. (1999). Students' reasoning about chemical reactions : What changes occur during a context-based post-16 chemistry course? *International Journal of Science Education*, 21(6), 645-665. <https://doi.org/10.1080/095006999290499>
- Barthes, A., Garnier, B., & Lange, J.-M. (2023). L'éducation au temps de l'anthropocène : Permanences, ruptures et spécificités des recherches face aux crises écologiques et climatiques. <https://www.openscience.fr>, 7(1). <https://doi.org/10.21494/ISTE.OP.2024.1117>
- Basheer, A., Kortam, N., Zahran, N., Hofestein, A., & Hugerat, M. (2018). Misconceptions among Middle School Students Regarding the Conservation of Mass during Combustion. *Eurasia Journal of Mathematics, Science and Technology Education*, 14(7), 3109-3122. <https://doi.org/10.29333/ejmste/91664>
- Beck, K., Witteck, T., & Eilks, I. (2010). Open Experimentation on Phenomena of Chemical Reactions via the Learning Company Approach in Early Secondary Chemistry Education. *Eurasia Journal of Mathematics, Science and Technology Education*, 6(3), 163-171. <https://doi.org/10.12973/ejmste/75237>
- Beillerot, J. (1989). Le rapport au savoir : Une notion en formation. In J. Beillerot, A. Bouillet, C. Blanchard-Laville, & N. Mosconi (Eds.), *Savoir et rapport au savoir: Elaborations théoriques et cliniques* (p. 165-200). Editions Universitaires.
- Ben Kilani, C. (2019). Analyse de pratiques ordinaires d'enseignement des caractères qualitatifs d'une réaction chimique en Tunisie. *RDST*, 20, Article 20. <https://doi.org/10.4000/rdst.2766>
- Bennett, J., & Lubben, F. (2006). Context-based chemistry : The Salters approach. *International Journal of Science Education*, 28(9), 999-1015.
- Bensaude-Vincent, B. (2021). *Temps-paysage. Pour une écologie des crises*. Le Pommier.
- Bensaude-Vincent, B., & Loeve, S. (2018). Penser carbone. In R. Beau & C. Larrère (Eds.), *Penser l'anthropocène*. Presses de Sciences Po.
- Bilir, V., & Karaçam, S. (2021). Evaluation of mental models of prospective science teachers on chemical reactions. *Journal of Pedagogical Research*, 5(1), 258-274. <https://doi.org/10.33902/JPR.2021167800>

- Blanchard-Laville, C. (2000). De la co-disciplinarité en sciences de l'éducation. *Revue française de pédagogie*, 132, 55-66.
- Bond, D. (1989). In Pursuit of Chemical Literacy : A Place for Chemical Reactions. *Journal of Chemical Education*, 66(2), 157-160.
- Bordi, C. (2017). *SVT, sciences de la vie et de la Terre cycle 4*. Lelivrescolaire.fr.  
<https://www.livrescolaire.fr/manuels/sciences-de-la-vie-et-de-la-terre-cycle4-2017>
- Bosch, M., & Chevillard, Y. (1999). La sensibilité de l'activité mathématique aux ostensifs. Objet d'étude et problématique. *Recherches en didactique des mathématiques*, 19(1), 77-123.
- Bouard, R., Canac, S., & Kermen, I. (2022). Modélisation des transformations chimiques : Mise en regard d'un programme et de pratiques enseignantes. *RDST*, 25, 69-100.  
<https://doi.org/10.4000/rdst.4165>
- Brandt-Pomares, P., & Lhoste, Y. (2013). L'éducation et l'enseignement scientifique et technologique : Analyse critique des évolutions actuelles. *RDST*, 7, article 7. <https://doi.org/10.4000/rdst.667>
- Brousseau, G. (1984). Le rôle du maître et l'institutionnalisation. In *Recueil de textes et comptes rendus, IIIème école d'été de didactique des mathématiques 2-13 juillet 1984, Olivet (Orléans)* (p. 43-47). équipe de didactique des mathématiques et de l'informatique Université 1 de Grenoble et CNRS Institut IMAG.
- Brousseau, G. (1986). Fondements et méthodes de la didactique des mathématiques. *Recherches en didactique des mathématiques*, 7(2), 33-115.
- Brousseau, G. (1990). Le contrat didactique : Le milieu. *Recherche en didactique des mathématiques*, 3(9), 309-336.
- Brousseau, G. (1998). *Théorie des situations didactiques*. La pensée sauvage.
- Brousseau, G. (2010). *Glossaire de quelques concepts de la théorie des situations didactiques en mathématiques (1998)*. Guy Brousseau. [http://guy-brousseau.com/wp-content/uploads/2010/09/Glossaire\\_V5.pdf](http://guy-brousseau.com/wp-content/uploads/2010/09/Glossaire_V5.pdf)
- Bruillard, E. (2005). Les manuels scolaires questionnés par la recherche. In E. Bruillard (Éd.), *Manuels scolaires, regards croisés* (p. 13-36). CRDP de Basse-Normandie.

- Burmeister, M., Rauch, F., & Eilks, I. (2012). Education for sustainable development (ESD) and chemistry education. *Chemistry Education Research and Practice*, 13, 59-68.
- Cailliez, J.-C., & Henin, C. (2017). *La classe renversée. L'Innovation pédagogique par le changement de posture*. Ellipses.
- Cakpo, E. (2023). « L'envers des mots » : *Essentialiser*. The conversation.  
<https://theconversation.com/lenvers-des-mots-essentialiser-201030>
- Çalik, M., & Ayas, A. (2005). A comparison of level of understanding of eighth-grade students and science student teachers related to selected chemistry concepts. *Journal of Research in Science Teaching*, 42(6), 638-667. <https://doi.org/10.1002/tea.20076>
- Canac, S. (2017). *Le langage symbolique de la chimie en tant que méta-niveau entre registre empirique et registre des modèles : Une problématique de l'enseignement-apprentissage de chimie* [thèse de doctorat]. Sorbonne Paris Cité. <https://www.theses.fr/2017USPCC071>
- Canac, S., & Kermen, I. (2016). Exploring the mastery of French students in using basic notions of the language of chemistry. *Chemistry Education Research and Practice*, 17(452), 452-473.  
<https://doi.org/10.1039/C6RP00023A>
- Candea, M., & Véron, L. (2019). *Le français est à nous ! La découverte*.
- Cavallo, A. M. L., McNeely, J. C., & Marek, E. A. (2003). Eliciting Students' Understandings of Chemical Reactions Using Two Forms of Essay Questions during a Learning Cycle. *International Journal of Science Education*, 25(5), 583-603.
- CERN. (2023). *La naissance du web*. home.cern. <https://home.cern/fr/science/computing/birth-web>
- Chandrasegaran, A. L., Treagust, D. F., & Mocerino, M. (2007). The development of a two-tier multiple-choice diagnostic instrument for evaluating secondary school students' ability to describe and explain chemical reactions using multiple levels of representation. *Chemistry Education Research and Practice*, 8(3), 293-307. <https://doi.org/10.1039/B7RP90006F>
- Chandrasegaran, A. L., Treagust, D. F., & Mocerino, M. (2008). An Evaluation of a Teaching Intervention to Promote Students' Ability to Use Multiple Levels of Representation When

- Describing and Explaining Chemical Reactions. *Research in Science Education*, 38(2), 237-248. <https://doi.org/10.1007/s11165-007-9046-9>
- Charlot, B. (1997). *Du Rapport au Savoir. Elements pour une théorie*. Anthropos.
- Charlot, B. (1999). *Le rapport au savoir en milieu populaire : Une recherche dans les lycées professionnels de banlieue*. Anthropos.
- Chauvigné, C., & Fabre, M. (2021). Questions socialement vives : Quelles approches possibles en milieu scolaire ? *Carrefours de l'éducation*, 2(52), 15-31.  
<https://doi.org/10.3917/cdle.052.0011>
- Chevallard, Y. (1985). *La transposition didactique. Du savoir savant au savoir enseigné*. La pensée sauvage.
- Chevallard, Y. (1991). *La transposition didactique. Du savoir savant au savoir enseigné*. (2e éd.). La pensée sauvage.
- Chevallard, Y. (1992). Concepts fondamentaux de la didactique : Perspectives apportées par un approche anthropologique. *Recherches en didactique des mathématiques*, 12(1), 73-112.
- Chevallard, Y. (1994). Les processus de transposition didactique et leur théorisation. In G. Arsac, Y. Chevallard, J.-L. Martinand, & A. Tiberghien (Eds.), *La transposition didactique à l'épreuve* (p. 135-180). La pensée sauvage.
- Chevallard, Y. (1999). L'analyse des pratiques enseignantes en théorie anthropologique du didactique. *Recherches en didactique des mathématiques*, 2(19), 221-266.
- Chevallard, Y. (2002). Organiser l'étude. Ecologie et régulation. In J.-L. Dorier, M. Artigue, R. Berthelot, & R. Floris (Eds.), *Actes de la XIème Ecole d'été de didactique des mathématiques* (p. 41-56). La pensée sauvage.  
[http://yves.chevallard.free.fr/spip/spip/IMG/pdf/Organiser\\_1\\_etude\\_3.pdf](http://yves.chevallard.free.fr/spip/spip/IMG/pdf/Organiser_1_etude_3.pdf)
- Chevallard, Y. (2004). *Vers une didactique de la codisciplinarité. Notes sur une nouvelle épistémologie scolaire*. Yves Chevallard.  
[http://yves.chevallard.free.fr/spip/spip/IMG/pdf/Vers\\_une\\_didactique\\_de\\_la\\_codisciplinarite.pdf](http://yves.chevallard.free.fr/spip/spip/IMG/pdf/Vers_une_didactique_de_la_codisciplinarite.pdf)

- Chevallard, Y. (2007). Éducation & didactique : Une tension essentielle. *Éducation et didactique*, 1(1), article 1-1. <https://doi.org/10.4000/educationdidactique.61>
- Chevallard, Y. (2010). La didactique, dites-vous ? *Education et didactique*, 4(1), 139-148. <https://doi.org/10.4000/educationdidactique.771>
- Chinn, C. A. (1997). *A microgenetic study of learning about the molecular theory of matter and chemical reactions* [PhD thesis]. University of Illinois. <https://www.proquest.com/openview/fdcba396c305139f6c7eefbb7761276d/1?cbl=18750&dis-s=y&pq-origsite=gscholar&parentSessionId=58HBn%2FwqgzvpDvAjGr8YB8FbftjH4yemqr3JE%2Bh8Yhw%3D>
- Chomat, A., Larcher, C., & Méheut, M. (1988). Modèle particulière et activités de modélisation en classe de quatrième. *Aster*, 7, 143-184.
- Çiğdemöğlü, C. (2012). *Effectiveness of context based approach through 5E learning cycle model on students' understanding of chemical reactions and energy concepts and their motivation to learn chemistry* [PhD thesis]. Middle East Technical University. <https://open.metu.edu.tr/handle/11511/21641>
- CIIP. (2010a). *10aB - L'Homme influence-t-il l'effet de serre ? Moyens d'enseignement romands*. <https://portail.ciip.ch/mer/teaching-mediums/58/geo91011/modules/7880>
- CIIP. (2010b). *Formation générale*. portail.ciip.ch. <https://portail.ciip.ch/per/domains/6>
- CIIP. (2010c). *Géographie cycle 3*. <https://www.plandetudes.ch/group/shs-c3/geo>
- CIIP. (2010d). *Phénomènes naturels et techniques (cycle 3)*. [https://www.plandetudes.ch/web/guest/MSN\\_36/](https://www.plandetudes.ch/web/guest/MSN_36/)
- CIIP. (2010e). *Photosynthèse et respiration des végétaux. Fiche de travail*.
- CIIP. (2010f). *Sciences de la nature cycle 3*. <https://www.ciip-esper.ch/#/discipline/6/9,10,11/>
- CIIP. (2010g). *SHS 31—Analyser des espaces géographiques et des relations établies entre les hommes et entre les sociétés à travers ceux-ci*. portail.ciip.ch. <https://portail.ciip.ch/per/learning-objectives/78>

- Cokelez, A. (2005). *Le registre des modèles (atome, molécule, ion, liaison chimique) dans l'enseignement de la matière et ses transformations au lycée : Du savoir de référence au savoir appris* [thèse de doctorat]. Université de Bordeaux 2.  
<https://www.theses.fr/2005BOR21198>
- Conception. (2012). In *CNRTL*. <https://www.cnrtl.fr/definition/conception>
- Conférence intercantonale de l'instruction publique de la Suisse romande et du Tessin. (2010).  
*Structure du Plan d'études romand*. <https://www.plandetudes.ch/web/guest/pg2-structure>
- Couteleau, L. (2017). *Sciences de la vie et de la Terre cycle 4 nouveau programme 2016*. Didier.
- Crahay, M. (1989). *Contraintes de situation et interactions maître-élève, Changer sa façon d'enseigner, est-ce possible ?* 88, 67-94. <https://doi.org/10.3406/rfp.1989.2459>
- Crutzen, P. J., & Stoermer, E. F. (2021). The 'Anthropocene' (2000). In S. Benner, G. Lax, P. J. Crutzen, U. Pöschl, J. Lelieveld, & H. G. Brauch (Eds.), *Paul J. Crutzen and the Anthropocene : A New Epoch in Earth's History* (p. 19-21). Springer International Publishing.  
[https://doi.org/10.1007/978-3-030-82202-6\\_2](https://doi.org/10.1007/978-3-030-82202-6_2)
- Darbellay, F. (2014). Où vont les studies ? Interdisciplinarité, transformation disciplinaire et pensée dialogique. *Questions de communication*, 25, article 25.  
<https://doi.org/10.4000/questionsdecommunication.9012>
- Daujean, C. (2017). *Physique chimie 4e nouveaux programmes 2016*. Hatier.
- Deavor, J. P. (1990). A Governor's School course emphasizing chemical reactions. *Journal of Chemical Education*, 67(8), 669. <https://doi.org/10.1021/ed067p669>
- de Cássia Reis, R., & da Silva Lopes, J. G. (2016). Elementary school students' conceptions of chemical transformation. *Revista Electrónica de Enseñanza de Las Ciencias*, 15(1), 24-42.
- Décret n° 2018-614 du 16 juillet 2018 modifiant les dispositions du code de l'éducation relatives aux enseignements conduisant au baccalauréat général et aux formations technologiques conduisant au baccalauréat technologique, 2018-614 Décret (2018).  
<https://www.legifrance.gouv.fr/jorf/id/JORFTEXT000037202561>

- Dehon, J., & Snauwaert, P. (2015). L'équation de réaction : Une équation à plusieurs inconnues. Étude de productions d'élèves de 16-17 ans (grade 11) en Belgique francophone. *RDST*, 12, article 12. <https://doi.org/10.4000/rdst.1174>
- Dehon, J., & Snauwaert, P. (2018). L'analogie entre la langue française et la chimie : Analyse linguistique et didactique. *Education et didactique*, 12(2), 9-27.
- de Jong, O. (1998). Points de vue de professeurs et de futurs professeurs de chimie concernant l'enseignement de la combustion. *Aster*, 26(1), 183-205. <https://doi.org/10.4267/2042/8697>
- de Jong, O., & van Driel, J. (2004). Exploring the Development of Student Teachers' PCK of the Multiple Meanings of Chemistry Topics. *International Journal of Science and Mathematics Education*, 2(4), 477-491. <https://doi.org/10.1007/s10763-004-4197-x>
- Dell'Angelo-Sauvage, M. (2008). Éléments de caractérisation du rapport au vivant chez des élèves de 10-12 ans. *Didaskalia*, 33(1), 7-32. <https://doi.org/10.4267/2042/28851>
- Demircioğlu, H., Dinç, M., & Çalik, M. (2013). The Effect of Storylines Embedded within Context-Based Learning Approach on Grade 6 Students' Understanding of « Physical and Chemical Change » Concept. *Journal of Baltic Science Education*, 12(5), 682-691. <https://doi.org/10.33225/jbse/13.12.682>
- de Saussure, F. (1989). *Cours de linguistique générale*. Otto Harrassowitz.
- Descola, P. (2015). *Par-delà nature et culture*. Gallimard.
- Descola, P. (2018). Humain, trop humain ? In R. Beau & C. Larrère (Eds.) *Penser l'Anthropocène* (p. 19-35). Presses de Sciences Po. <https://doi.org/10.3917/scpo.beaur.2018.01.0019>
- Desormes, H. (2017). *SVT, sciences de la vie et de la Terre cycle 4*. Hachette Education.
- Develay, M. (1992). *De l'apprentissage à l'enseignement*. ESF éditeur.
- DIP. (2021). *Sections et profils en 11e année du cycle d'orientation*. République et canton de Genève - DIP. <https://edu.ge.ch/enseignement/cycle-orientation/gestion-administrative>
- Donadéi, E., & Lévêque, T. (2017). *Physique Chimie 4e, Cycle 4 Nouveau Programme*. Belin Education.
- Drouin, A.-M. (1988). Le modèle en questions. *Aster*, 7(1), 1-20. <https://doi.org/10.4267/2042/9214>

- Druide informatique. (2021). *Antidote 11* [Logiciel]. <https://www.antidote.info/fr/antidote-11>
- Duco, A. (2017). *SVT, sciences de la vie et de la terre cycle 4 5e, 4e, 3e nouveau programme, brevet 2017*. Nathan.
- Dulaurans, T. (2017). *Physique, chimie cycle 4*. Hachette Education.
- Dumon, A., & Mzoughi-Khadhraoui, I. (2014). Teaching chemical change modeling to Tunisian students : An “expanded chemistry triplet” for analyzing teachers’ discourse. *Chemistry Education Research and Practice*, 15(70), 70-80.
- Düsing, K., Asshoff, R., & Hammann, M. (2019). Tracing matter in the carbon cycle : Zooming in on high school students’ understanding of carbon compounds and their transformations. *International Journal of Science Education*, 41(17), 2484-2507.  
<https://doi.org/10.1080/09500693.2019.1686665>
- Eilks, I., & Rauch, F. (2012). Sustainable development and green chemistry in chemistry education. *Chemistry Education Research and Practice*, 13(2), 57-58.  
<https://doi.org/10.1039/C2RP90003C>
- Eilks, I., Rauch, F., Ralle, B., & Hofstein, A. (2013). How to allocate the chemistry curriculum between science and society. In I. Eilks & A. Hofstein (Eds.), *Teaching chemistry — A Studybook* (p. 1-36). Sense Publishers.
- El Bilani, R. (2007). *Nature des connaissances mises en jeu par les élèves et les enseignants lors de l’utilisation des TICE en chimie : Cas de la réaction chimique dans l’enseignement secondaire* [thèse de doctorat]. Université de Lyon 2 et Université Libanaise.  
<https://www.theses.fr/2007LYO20040>
- Emden, M., Weber, K., & Sumfleth, E. (2018). Evaluating a learning progression on ‘Transformation of Matter’ on the lower secondary level. *Chemistry Education Research and Practice*, 19(4), 1096-1116. <https://doi.org/10.1039/C8RP00137E>
- Eskilsson, O., & Helldèn, G. (2003). A Longitudinal Study on 10-12-Year-Olds’ Conceptions of the Transformations of Matter. *Chemistry Education Research and Practice*, 4(3), 291-304.  
<https://doi.org/10.1039/B2RP90046G>

- Essentiel. (s. d.). In *CNRTL*. <https://www.cnrtl.fr/definition/essentiel>
- Energie. (s. d.). In *Le Robert en ligne*. <https://dictionnaire.lerobert.com/definition/energie>
- Epistémologie. (s. d.). In *CNRTL*. <https://www.cnrtl.fr/definition/%C3%A9pist%C3%A9mologie>
- Ewais, A., & De Troyer, O. (2019). A Usability and Acceptance Evaluation of the Use of Augmented Reality for Learning Atoms and Molecules Reaction by Primary School Female Students in Palestine. *Journal of Educational Computing Research*, 57(7), 1643-1670.
- Eyceyurt-Türk, G., & Tüzün, Ü. N. (2021). Pre-Service Science Teachers' Images and Misconceptions about Chemical Equilibrium. *Educational Policy Analysis and Strategic Research*, 16(4), 218-233.
- Fabre, M. (2011). Est-il possible d'éduquer dans un monde problématique ? *Revue internationale de philosophie*, 3(257), 97-118. <https://doi.org/10.3917/rip.257.0097>
- Fabre, M. (2014). Les « Educations à » : Problématisation et prudence. *Education et socialisation*, 36. <https://doi.org/10.4000/edso.875>
- Fabre, M. (2021). Problématologie des questions socialement vives. Repères épistémologiques pour l'école. *Revue française de pédagogie*, 210(1), 89-99. <https://doi.org/10.4000/rfp.10118>
- Fabre, M., & Orange, C. (1997). Construction des problèmes et franchissements d'obstacles. *Aster : Recherches en didactique des sciences expérimentales*, 24(1), 37-57. <https://doi.org/10.4267/2042/8668>
- Fahlman, B. D., Purvis-Roberts, K. L., Kirk, J. S., Bentley, A. K., Daubenmire, P. L., Ellis, J. P., & Mury, M. T. (2018). *Chemistry in context* (9e éd.). McGraw-Hill.
- Falk, D. F. (1956). *The learning of chemical equations : Meaningful versus mechanical methods* [PhD thesis]. University of California.
- Falk, D. F. (1962). The learning of chemical equations : Meaningful versus mechanical methods. *Science Education*, 46(1), 37-42. <https://doi.org/10.1002/sce.3730460106>
- Feierabend, T., Jokmin, S., & Eilks, I. (2011). Chemistry teachers' views on teaching 'climate change' - an interview case study from research-oriented learning in teacher education. *Chemistry education research and practice*, 12(1), 85-91.

- Fensham, P. J. (Ed.). (1988). *Development and Dilemmas in Science Education*. Psychology Press.
- Flener-Lovitt, C. (2014). Using the socioscientific context of climate change to teach chemical content and the nature of science. *Journal of chemical education*, *91*, 1587-1593.  
<https://doi.org/10.1021/ed4006985>
- Fondin, H. (1979). La langue de la publication scientifique : La prépondérance de l'anglais et la recherche. *Documentation et bibliothèques*, *25*(2), 59-69. <https://doi.org/10.7202/1054357ar>
- Franc, S. (2012). *Savoirs, affectivité et comportements : Articulation de trois dimensions pour comprendre comment se construisent les apprentissages dans le contexte de l'éducation à la biodiversité. Le cas de l'étude d'arthropodes à l'école primaire en France* [thèse de doctorat]. Université Montpellier II et Université de Sherbrooke. <https://theses.hal.science/tel-00743867>
- Franchot, N., & Fray, B. (2017). *Physique chimie 4e*. Lelivrescolaire.fr.  
<https://www.lelivrescolaire.fr/manuels/physique-chimie-4eme-2017>
- Furió, C. J., Bullejos, J., & Manuel, E. de. (1994). L'apprentissage de la réaction chimique comme activité de recherche. *Aster*, *18*(1), 141-164. <https://doi.org/10.4267/2042/8603>
- Gabby, S., Avargil, S., Herscovitz, O., & Judy Dori, Y. (2017). The case of middle and high school chemistry teachers implementing technology : Using the concerns-based adoption model to assess change processes. *Chemistry Education Research and Practice*, *18*(1), 214-232.  
<https://doi.org/10.1039/C6RP00193A>
- Gardarein, J. (2017). *SVT, sciences de la vie et de la Terre manuel de cycle 4*. Hatier.
- Garnett, P. J., Garnett, P. J., & Hackling, M. W. (1995). Students' Alternative Conceptions in Chemistry : A Review of Research and Implications for Teaching and Learning. *Studies in Science Education*, *25*(1), 69-96. <https://doi.org/10.1080/03057269508560050>
- Gascon, J. (1998). Evolución de la didáctica de las matemáticas como disciplina científica. *Recherches en didactiques des mathématiques*, *18*(1), 7-34.
- Gaudillière, J.-P. (1994). Lavoisier, Priestley, le phlogistique et l'oxygène : De l'étude de controverse à la réplication pédagogique. *Aster*, *18*(1), 183-215. <https://doi.org/10.4267/2042/8605>

- GIEC. (2013). *Carbon and Other Biochemical Cycles* [Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change].  
[https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/WG1AR5\\_Chapter06\\_FINAL.pdf](https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/WG1AR5_Chapter06_FINAL.pdf)
- GIEC. (2014). *Changements climatiques 2014 : Rapport de synthèse. Contribution des Groupes de travail I, II et III au cinquième Rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat*. GIEC.  
[https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/SYR\\_AR5\\_FINAL\\_full\\_fr.pdf](https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/SYR_AR5_FINAL_full_fr.pdf)
- GIEC. (2021). *Changement climatique 2021 : Les bases scientifiques physiques. Contribution du Groupe de travail I au sixième Rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat*. GIEC.  
[https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/report/IPCC\\_AR6\\_WG1\\_SPM\\_French.pdf](https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/report/IPCC_AR6_WG1_SPM_French.pdf)
- Gielniak, M. G. (2009). *Effects of Representational Movement on Short and Long-Term Ability of Rural Tenth-Grade Students to Solve Chemical Equations* [PhD thesis]. Oakland University. ProQuest LLC. <http://www.proquest.com/en-US/products/dissertations/individuals.shtml>.  
[http://gateway.proquest.com/openurl?url\\_ver=Z39.88-2004&rft\\_val\\_fmt=info:ofi/fmt:kev:mtx:dissertation&res\\_dat=xri:pqdiss&rft\\_dat=xri:pqdiss:3367684](http://gateway.proquest.com/openurl?url_ver=Z39.88-2004&rft_val_fmt=info:ofi/fmt:kev:mtx:dissertation&res_dat=xri:pqdiss&rft_dat=xri:pqdiss:3367684)
- Girault, Y., & Sauvé, L. (2008). L'éducation scientifique, l'éducation à l'environnement et l'éducation pour le développement durable. *Aster*, 46, 7-30.
- Glazer, N. (2011). *The Use of Construct Maps in Understanding 7th Grade Students' Learning of Chemical Reaction*. [PhD thesis]. University of Michigan.  
<http://deepblue.lib.umich.edu/handle/2027.42/86358>
- Gomez, M.-A., Pozo, J.-I., & Sanz, A. (1995). Students' ideas on conservation of matter : Effects of expertise and context variables. *Science Education*, 79(1), 77-93.  
<https://doi.org/10.1002/sce.3730790106>

- Gupta, A., Hill, N., Valenzuela, P., & Johnson, E. (2017). Introducing Chemical Reactions Concepts in K-6 through a Hands-On Food Spherification and Spaghetti-Fication Experiment. *Journal of STEM Education: Innovations and Research*, 18(1), 6-10.
- Haeckel, E. (1905). *Le monisme : Profession de foi d'un naturaliste*. Schleicher frères.
- Hamel, R. E. (2013). L'anglais, langue unique pour les sciences ? Le rôle des modèles plurilingues dans la recherche, la communication scientifique et l'enseignement supérieur GERFLINT. *Synergies Europe*, 8, 53-66.
- Härmälä-Braskén, A.-S., Hemmi, K., & Kurtén, B. (2020). Misconceptions in chemistry among Finnish prospective primary school teachers – a long-term study. *International Journal of Science Education*, 42(9), 1447-1464. <https://doi.org/10.1080/09500693.2020.1765046>
- Harré, R. (2008). Some presuppositions in the metaphysics of chemical reactions. *Foundations of Chemistry*, 10(1), 19-38. <https://doi.org/10.1007/s10698-005-9000-8>
- Herrmann-Abell, C. F., Koppal, M., & Roseman, J. E. (2016). « Toward High School Biology » : Helping Middle School Students Understand Chemical Reactions and Conservation of Mass in Nonliving and Living Systems. *CBE - Life Sciences Education*, 15(4). <https://doi.org/10.1187/cbe.16-03-0112>
- Hersant, M. (2004). Caractérisation d'une pratique d'enseignement, le cours dialogué. *Revue canadienne de l'enseignement des sciences, des mathématiques et des technologies*, 4(2), 241-258. <https://doi.org/hal-00450482>
- Hervé, N. (2012). *Analyses des pratiques d'enseignement de savoirs de la physique stabilisés (l'énergie) et controversés (le changement climatique)* [thèse de doctorat]. Université Toulouse 2 Le Mirail.
- Hervé, N., Venturini, P., & Albe, V. (2013). Enseigner un savoir stabilisé et une controverse socioscientifique, quelles différences et similitudes ? Exemple d'une pratique ordinaire d'enseignement en physique. *Dossier des Sciences de l'Education*, 29, 45-66.
- Hesse, J. J. I. (1987). *Student conceptions of chemical change* [PhD thesis]. Michigan State University.

- Hesse, J. J. I., & Anderson, C. W. (1992). Students' conceptions of chemical change. *Journal of Research in Science Teaching*, 29(3), 277-299. <https://doi.org/10.1002/tea.3660290307>
- Heymann, M., & Dahan Dalmedico, A. (2019). Epistemology and politics in Earth System modeling : Historical perspectives. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 11, 1139-1152.
- Hodson, D. (2003). Time for action : Science education for an alternative future. *International Journal of Science Education*, 25(6), 645-670.
- Hodson, D., Bencze, J., & Alsop, S. (2014). Becoming Part of the Solution : Learning about Activism, Learning through Activism, Learning from Activism. In S. Alsop & J. Bencze (Eds.), *Activist Science and Technology Education* (p. 67-98). Springer.
- Holgersson, I., & Löfgren, L. (2004). A Long-Term Study of Students' Explanations of Transformations of Matter. *Canadian Journal of Science, Mathematics and Technology Education*, 4(1), 77-96. <https://doi.org/10.1080/14926150409556598>
- Huddle, P. A., & Pillay, A. E. (1996). An In-Depth Study of Misconceptions in Stoichiometry and Chemical Equilibrium at a South African University. *Journal of Research in Science Teaching*, 33(1), 65-77.
- Hugerat, M., & Basheer, S. (2001). Experimental Demonstrations in Teaching Chemical Reactions. *Revista de Educacion en Ciencias*, 2(2), 109-111.
- Husson, F., Josse, J., & Lê, S. (2008). *FactoMineR: an R Package for Multivariate Analysis*. [Logiciel].
- IPCC. (2013). *Carbon and Other Biogeochemical Cycles*. <https://www.ipcc.ch/report/ar5/wg1/carbon-and-other-biogeochemical-cycles/>
- Jacob, C. (2001). Analysis and Synthesis : Interdependent Operations in Chemical Language and Practice. *Hyle: An International Journal for The Philosophy of Chemistry*, 7, 31-50.
- Jakobsson, A., Mäkitalo, Å., & Säljö, R. (2009). Conceptions of knowledge in research on students' understanding of the greenhouse effect : Methodological positions and their consequences for representations of knowing. *Science Education*, 93(6), 978-995. <https://doi.org/10.1002/sce.20341>

- Jarrige, F. (2016). *Technocritiques. Du refus des machines à la contestation des technosciences*. La découverte.
- Jaubert, M. (2007). *Langage et construction des connaissances à l'école, un exemple en sciences*. Presses Universitaires de Bordeaux.
- Jaubert, M., & Rebière, M. (2000). Observer l'activité langagières des élèves en classe de sciences. *Aster*, 31, 173-195.
- Jensen, B. B. (2002). Knowledge, Action and Pro-environmental Behaviour. *Environmental Education Research*, 8(3), 325-334. <https://doi.org/10.1080/13504620220145474>
- Johnson, P. (2000). Children's understanding of substances, part 1 : Recognizing chemical change. *International Journal of Science Education*, 22(7), 719-737. <https://doi.org/10.1080/09500690050044062>
- Johnson, P. (2002). Children's understanding of substances, Part 2 : Explaining chemical change. *International Journal of Science Education*, 24(10), 1037-1054. <https://doi.org/10.1080/09500690110095339>
- Johnstone, A. H. (1982). Macro- and microchemistry. [Notes and correspondance]. *School Science Review*, 64(227), 377-379.
- Johnstone, A. H. (1991). Why is science difficult to learn? Things are seldom what they seem. *Journal of Computer Assisted Learning*, 7(2), 75-83. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2729.1991.tb00230.x>
- Johnstone, A. H. (1993). The development of chemistry teaching : A changing response to changing demand. *Journal of Chemical Education*, 70(9), 701. <https://doi.org/10.1021/ed070p701>
- Johnstone, A. H. (2000). Teaching of chemistry, logical or psychological ? *Chemistry Education Research and Practice*, 1(1), 9-15.
- Johsua, S. (1996). Le concept de transposition didactique n'est-il propre qu'aux mathématiques ? In C. Raisy & M. Caillot (Eds.), *Au-delà des didactiques, le didactique. Débats autour de concepts fédérateurs*. (p. 61-73). De Boeck Université.

- Jubault-Bregler, M., & Guillerme, D. (2017). *SVT Sciences De La Vie Et De La Terre 4e, Cycle 4*. Nathan.
- Justi, R. (2006). Teaching and Learning about Chemical Change. In J. K. Gilbert, O. de Jong, R. Justi, D. F. Treagust, & J. H. van Driel (Eds.), *Chemical Education : Towards Research-based Practice*. Springer Science & Business Media.
- Justi, R., & Gilbert, J. (2003). Models and Modelling in Chemical Education. In J. K. Gilbert, O. de Jong, R. Justi, D. F. Treagust, & J. H. van Driel (Eds.), *Chemical Education : Towards Research-based Practice* (p. 47-68). Springer Netherlands. [https://doi.org/10.1007/0-306-47977-X\\_3](https://doi.org/10.1007/0-306-47977-X_3)
- Kermen, I. (2018). *Enseigner l'évolution des systèmes chimiques au lycée*. Presses Universitaires de Rennes.
- Kermen, I. (2022). Système sémiotiques spécifiques de la chimie et leur apprentissage. In C. Houdement, C. de Hosson, & C. Hache (Eds.), *Approches sémiotiques en didactique des sciences* (p. 47-86). ISTE Editions.
- Kermen, I., & Canac, S. (2021). Espèce chimique, entité chimique, substance chimique ? Réflexion critique autour du glossaire d'accompagnement des programmes de chimie 2019. *Bulletin de l'Union des Physiciens*, 115(1030), 29-41.
- Kermen, I., & Méheut, M. (2009). Different models used to interpret chemical changes : Analysis of a curriculum and its impact on French students' reasoning. *Chemistry Education Research and Practice*, 10, 24-34.
- Kibirige, I., & Lehong, M. J. (2022). A comparative study of the Jigsaw and Chalk-and-Talk Methods on grade 12 learners' achievements in reaction rates in South Africa. *Kıbrıslı Eğitim Bilimleri Dergisi*, 17(11), 4230-4245.
- Kibirige, I., & Maake, R. M. (2021). The effect of guided discovery instructional strategy on grade nine learners' performance in chemical reactions in Mankweng circuit, South Africa. *Journal of Technology and Science Education*, 11(2), article 2. <https://doi.org/10.3926/jotse.1295>

- Kingir, S., Geban, O., & Gunel, M. (2014). Using the Science Writing Heuristic Approach to Enhance Student Understanding in Chemical Change and Mixture. *Research in Science Education*, 43(4), 1645-1663.
- Kolomuç, A., & Tekin, S. (2011). Chemistry Teachers' Misconceptions Concerning Concept of Chemical Reaction Rate. *International Journal of Physics and Chemistry Education*, 3(2), article 2. <https://doi.org/10.51724/ijpce.v3i2.194>
- Koulougliotis, D., Antonoglou, L., & Salta, K. (2021). Probing Greek secondary school students' awareness of green chemistry principles infused in context-based projects related to socio-scientific issues. *International Journal of Science Education*, 43(2), 298-313. <https://doi.org/10.1080/09500693.2020.1867327>
- Kypraios, N., Papageorgiou, G., & Stamovlasis, D. (2014). The Role of Some Individual Differences in Understanding Chemical Changes. *International Journal of Environmental and Science Education*, 9(4), 413-427.
- Labbe Espéret, C. (2002). *Modélisation et conceptualisation : L'exemple du cycle du carbone* [thèse de doctorat]. Université de La Réunion. <https://www.theses.fr/2002LARE0007>
- Lajium, D. A. D. (2013). *Students' Mental Models of Chemical Reactions* [PhD dissertation, University of Waikato]. <https://researchcommons.waikato.ac.nz/handle/10289/7839>
- Lange, J.-M., & Barthes, A. (2021). « Éducation à » et « Questions socialement vives » : Éduquer en contexte d'anthropocène. *Carrefours de l'éducation*, 52(2), 133-147. <https://doi.org/10.3917/cdle.052.0125>
- Lange, J.-M., & Victor, P. (2006). Didactique curriculaire et « éducation à... la santé, l'environnement et au développement durable » : Quelles questions, quels repères ? *Aster*, 28, 85-100. <https://doi.org/10.4267/2042/23954>
- Larcher, C., Chomat, A., & Lineatte, C. (1994). D'une représentation à une autre pour modéliser les transformations de la matière au collège. *Aster*, 18, 120-139.

- Larcher, G. (2016). *Profil spectral des raies d'absorption du dioxyde de carbone en vue d'application à l'étude de l'atmosphère de la Terre par télédétection* [thèse de doctorat]. Université Pierre et Marie Curie - Paris VI. <https://theses.hal.science/tel-01359241>
- Laszlo, P. (1993). *La parole des choses*. Hermann.
- Laugier, A. (1998). *Représentation de la réaction chimique dans les registres macroscopique et microscopique : Contribution au repérage des obstacles épistémologiques. Une étude en classe de seconde* [thèse de doctorat]. Université de Pau.  
<https://www.theses.fr/1998PAUU3008>
- Laugier, A., & Dumon, A. (2003). Obstacles épistémologiques et didactiques à la construction du concept d'élément chimique : Quelles convergences ? *Didaskalia*, 22, 69-97.
- Laugier, A., & Dumon, A. (2004). L'équation de réaction : Un nœud d'obstacles difficilement franchissable. *Chemistry Education Research and Practice*, 5(1), 51-68.
- Laugier, A., & Padeloup, M. (1994). «Expérience-découverte», combustions et transformations de la matière à l'école élémentaire. *Aster*, 18(1), 97-117. <https://doi.org/10.4267/2042/8601>
- Le Maréchal, J.-F. (1999a). Design of chemistry labwork activities aiming at teaching basic chemical concepts. In M. Méheut & G. Rebmann (Eds.), *Theory, methodology and results of research in science education/fourth European science education summerschool, Marly-le-Roi, august 26th-September 2nd, 1998* (p. 68-80).
- Le Maréchal, J.-F. (1999b). Modelling student's cognitive activity during the resolution of problems based on experimental facts in chemical education. In J. Leach & A. C. Paulsen (Eds.), *Practical work in science education. Recent research studies* (p. 195-2009). Roskilde university Press.
- Le Maréchal, J.-F., & Bécu-Robinault, K. (2006). La simulation en chimie au sein du projet Microméga®. *Aster*, 43(1), 81-107. <https://doi.org/10.4267/2042/16803>
- Lebeaume, J. (2019). L'école du socle : Un curriculum. Perspectives pour les recherches didactiques. *Contextes et didactiques*, 14. <https://doi.org/10.4000/ced.1275>

- Lebeaume, J. (2021). Diversité des approches en didactique des sciences et des technologies. *Recherche et formation*, 98. <https://journals.openedition.org/rechercheformation/6633>
- Legardez, A., & Simonneaux, J. (2006). *L'école à l'épreuve de l'actualité. Enseigner des questions vives*. ESF éditeur.
- Legendre, R. (2005). *Dictionnaire actuel de l'éducation* (3e Ed). Guérin.
- Lenoble-Pinson, M. (2008). Mettre au féminin les noms de métier : Résistances culturelles et sociolinguistiques. *Le français aujourd'hui*, 163(4), 73-79.
- Lenoir, Y. (1991). *Relations entre interdisciplinarité et intégration des apprentissages dans l'enseignement des programmes d'études du primaire au Québec* [thèse de doctorat]. Université de Paris 7. <https://www.theses.fr/1991PA070056>
- Lenoir, Y. (2015). Quelle interdisciplinarité à l'école ? *Les Cahiers pédagogiques*, 54, 1-8.
- Lenoir, Y. (2020). L'interdisciplinarité dans l'enseignement primaire : Pour des processus d'enseignement-apprentissage intégrateurs. *Tréma*, 54, article 54. <https://doi.org/10.4000/trema.5952>
- Lenoir, Y., & Hasni, A. (2016). Interdisciplinarity in Primary and Secondary School : Issues and Perspectives. *Creative Education*, 7(16), article 16. <https://doi.org/10.4236/ce.2016.716233>
- Lenoir, Y., & Sauvé, L. (1998). Introduction. L'interdisciplinarité et la formation à l'enseignement primaire et secondaire : Quelle interdisciplinarité pour quelle formation ? *Revue des sciences de l'éducation*, 24(1), 3-29. <https://doi.org/10.7202/031959ar>
- Lévi, P. (1975). *Le Système périodique* (traduit par A. Maug ). Albin Michel.
- Lévi-Strauss, C. (1973). Jean-Jacques Rousseau fondateur des sciences de l'Homme. In C. Lévi-Strauss, *Anthropologie structurale II* (p. 45-56). Plon.
- Lévi-Strauss, C. (2011). *L'anthropologie face aux problèmes du monde moderne*. Seuil.
- Ligozat, F. (2008). *Un point de vue de didactique comparée sur la classe de mathématiques :  tude de l'action conjointe du professeur et des élèves à propos de l'enseignement/apprentissage de la mesure des grandeurs dans des classes françaises et suisse romandes* [thèse de doctorat]. Université de Genève et Université d'Aix-Marseille.

- Ligozat, F. (2011). The determinants of Joint Action in didactics : The Text-action Relationship in Teaching Practice. In B. Hudson & M. A. Meyer (Eds.), *Beyond fragmentation : Didactics, learning and teaching in Europe* (p. 157-176). Barbara Budrich Publishers.
- Ligozat, F. (2015). L'analyse didactique des pratiques de classe : Outil et démarche d'identification des logiques d'action enseignantes en mathématiques. *Formation et pratiques d'enseignement en questions*, 18, 17-37.
- Ligozat, F. (2016). Didactique comparée : Quels enjeux pour la construction d'un champ de recherches en didactique ? Une étude cas en classe de français. In Y. Matheron, G. Gueudet, M. Krysinska, M. Rogalski, L. Trouche, C. Winslow, S. Quilio, & T. Angel Sierra (Eds.), *Enjeux et débats en didactique des mathématiques* (p. 277-310). La pensée sauvage.
- Ligozat, F., & Leutenegger, F. (2008). Construction de la référence et milieux différentiels dans l'action conjointe du professeur et des élèves. Le cas d'un problème d'agrandissement des distances. *Recherches en didactique des mathématiques*, 28(3), 319-378.
- Ligozat, F., & Leutenegger, F. (2023). Didactique comparée. Un champ de recherche pour l'étude des systèmes didactiques. In F. Ligozat & F. Leutenegger (Eds.), *L'exercice comparatiste en didactique. Outils et concepts pour l'étude des systèmes didactiques* (Presses Universitaires de Bordeaux).
- Lowe, A. (2002). La pédagogie actualisante ouvre ses portes à l'interdisciplinarité scolaire. *Éducation et francophonie*, 30(2), 220-240. <https://doi.org/10.7202/1079532ar>
- Mahaffy, P. G. (2017). Beyond “Inert” Ideas to Teaching General Chemistry from Rich Contexts : Visualizing the Chemistry of Climate Change (VC3). *Journal of Chemical Education*, 94(8). <https://doi.org/10.1021/acs.jchemed.6b01009>
- Markic, S., Eilks, I., & Ralle, B. (2010). German chemistry teachers' curriculum emphases and their distinction between different types and levels of secondary schools. In M. F. Tasar & G. Cakmakci (Eds.), *Contemporary science education research : Pre-service and in-service teacher education*. (p. 177-185). Pegem Akademi.

- Marlot, C., & Toullec-Théry, M. (2014). Normes professionnelles et épistémologie pratique de l'enseignant : Un point de vue didactique. *Revue canadienne de l'éducation*, 37(4), 1-32.
- Marmaroti, P., & Galanopoulou, D. (2006). Pupils' Understanding of Photosynthesis : A questionnaire for the simultaneous assessment of all aspects. *International Journal of Science Education*, 28(4), 383-403. <https://doi.org/10.1080/09500690500277805>
- Maron, V., Dufresne, J.-L., Pelissier, L., Rabier, A., & Cochepin, M. (2022). *Comprendre l'origine du réchauffement climatique—Comment construire le lien entre émissions de CO2 et température moyenne de la Terre ?* 12èmes rencontres scientifiques de l'Association pour les Recherches en Didactique des Sciences et des Technologies (ARDiST). <https://hal.science/hal-03881838>
- Martin del Pozo, R., & Porlán, R. (2001). Spanish Prospective Teachers' Initial Ideas About Teaching Chemical Change. *Chemistry Education Research and Practice*, 2(3), 265-283. <https://doi.org/10.1039/B1RP90028E>
- Martinand, J.-L. (1986). *Connaître et transformer la matière. Deux objectifs pour l'initiation aux sciences et techniques*. Peter Lang.
- Martinand, J.-L. (1998). Introduction à la modélisation. In G.-L. Baron & A. Durey (Eds.), *Actes de l'université d'été 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*. INRP/ENS Cachan. <http://www.inrp.fr/Tecne/Rencontre/Univete/Tic/Pdf/Modelisa.pdf>
- Martinand, J.-L. (2000). Missions de l'éducation scientifique et technique. *Revue internationale d'éducation de Sèvres*, 25, 9-12. <https://doi.org/10.4000/ries.2550>
- Martinand, J.-L. (2008). Environnement et interdisciplinarité : Paradoxes dans le champ éducatif. *Natures Sciences et Sociétés*, 16(1), 1-2.
- Martinand, J.-L. (2014). Point de vue V – Didactique des sciences et techniques, didactique du curriculum. *Éducation et didactique*, 8(1), 65-76. <https://doi.org/10.4000/educationdidactique.1886>

- Martinand, J.-L. (2016). Défis et problèmes de l'éducation populaire au développement durable. *Cahiers de l'action*, 1(47), 25-33.
- Marty, L. (2019). *Continuité de l'expérience d'apprentissage et transposition didactique des savoirs dans l'enseignement de la physique Comparaison internationale dans le cas des propriétés de la matière* [thèse de doctorat]. Université de Genève et Université de Toulouse Jean Jaurès.
- Marty, L., & Ligozat, F. (2019). Une lecture de l'enseignement des sciences physiques dans le Plan d'études romand à la lumière d'une comparaison avec les programmes français. *Formation et pratiques d'enseignement en questions*, 24, 19-38.
- Marty, L., Ligozat, F., & Venturini, P. (2023). Structuration des situations didactiques et continuités dans la dynamique de construction des savoirs en sciences. *Éducation et didactique*, 17(2), Article 17-2. <https://doi.org/10.4000/educationdidactique.11613>
- McCright, A., O'Shea, B., Sweeder, R. D., Urquhart, G. R., & Zeleke, A. (2013). Promoting interdisciplinarity through climate change education. *Nature climate change*, 13, 713-716.
- McNeill, K. L., & Vaughn, M. (2012). Urban High School Students' Critical Science Agency : Conceptual Understanding and Environmental Actions Around Climate Change. *Research in science education*, 42, 373-399.
- Méheut, M. (1982). *Combustions et réaction chimique dans un enseignement destiné à des élèves de sixième* [thèse de doctorat]. Université de Paris.
- Méheut, M. (1985). Pupils' (II - 12 year olds) conceptions of combustion. *European Journal of Science Education*, 7(1), 83-93. <https://doi.org/10.1080/0140528850070109>
- Méheut, M., Saltier, E., & Tiberghien, A. (1984). A propos de l'enseignement des combustions en classe de sixième. *Bulletin de l'Union des Physiciens*, 666, 1303-1313.
- Meneret Noisette, D. (2017). *Physique chimie cycle 4, 5e, 4e, 3e programme 2016*. Magnard.
- Mercier, A. (1995). Le traitement public d'éléments privés du rapport des élèves aux objets de savoir mathématiques. In G. Arsac, J. Gréa, D. Grenier, & A. Tiberghien (Eds.), *Différents types de savoirs et leur articulation* (p. 145-169). La pensée sauvage.

- Mercier, A. (2002). La transposition des objets d'enseignement et la définition de l'espace didactique, en mathématiques. *Revue française de pédagogie*, 141, 135-171.
- Mercier, A. (2008). Pour une lecture anthropologique du programme didactique. *Education et didactique*, 2(1), 7-40. <https://doi.org/10.4000/educationdidactique.251>
- Mercier, A., Schubauer-Leoni, M.-L., & Sensevy, G. (2002). Vers une didactique comparée. *Revue française de pédagogie*, 141, 5-16.
- Merino, C., & Sanmarti, N. (2008). How young children model chemical change. *Chemistry Education Research and Practice*, 9(3), 196-207. <https://doi.org/10.1039/B812408F>
- Merino Rubilar, C. G. (2009). *Aportes a la Caracterización del Modelo Cambio Químico Escolar* [thesis doctoral]. Universitat Autònoma de Barcelona. Tesis Doctorals en Xarxa. <https://www.tdx.cat/handle/10803/4724>
- Meyer, J. H., Land, R., & Baillie, C. (Eds.). (2010). *Threshold concepts and transformational learning*. Sense Publishers.
- Miani, L. (2021). *Highlighting Interdisciplinarity between Physics and Mathematics in Historical Papers on Special Relativity : Design of Blended Activities for Pre-Service Teacher Education* [PhD thesis]. University of Bologna.
- Microscopique. (s.d.). In *CNRTL*. <https://www.cnrtl.fr/definition/microscopique>
- Milanovic, V., & Trivic, D. (2017). History of Chemistry as a Part of Assessment of Student's Understanding of the Law of Conservation of Mass. *Journal of Baltic Science Education*, 16(5), 780-796. <https://doi.org/10.33225/jbse/17.16.780>
- Ministère de l'Éducation nationale, de la jeunesse, des sports et des jeux olympiques et paralympiques. (2024). *Enseignements pratiques interdisciplinaires*. éducol. <https://eduscol.education.fr/272/enseignements-pratiques-interdisciplinaires>
- Ministère de l'Éducation nationale, de la jeunesse et des sports. (2018). *Programme du cycle 4*. [https://ww2.ac-poitiers.fr/math\\_sp/sites/math\\_sp/IMG/pdf/cycle\\_4\\_programme\\_consolide\\_1038204.pdf](https://ww2.ac-poitiers.fr/math_sp/sites/math_sp/IMG/pdf/cycle_4_programme_consolide_1038204.pdf)

- Ministère de l'Education nationale, de la jeunesse et des sports. (2020). *Programme d'enseignements du cycle des approfondissements (cycle 4)*.  
[https://cache.media.education.gouv.fr/file/31/89/1/ensel714\\_annexe3\\_1312891.pdf](https://cache.media.education.gouv.fr/file/31/89/1/ensel714_annexe3_1312891.pdf)
- Ministère de l'Education nationale, de l'enseignement supérieur et de la recherche. (2004).  
*Enseignements élémentaire et secondaire : Instructions pédagogiques*.  
<https://www.education.gouv.fr/bo/2004/28/MENE0400752C.htm>
- Ministère de l'Education nationale, de l'enseignement supérieur et de la recherche, & Ministère de la Culture et de la Communication. (2017). *Stratégie nationale de culture scientifique, technique et industrielle*. <https://www.vie-publique.fr/rapport/36586-strategie-nationale-de-culture-scientifique-technique-et-industrielle>
- Ministère de l'Education nationale et de la jeunesse. (2014). *Classes bi-langues et sections européennes ou de langues orientales (SELO) en collège*. [education.gouv.fr](http://education.gouv.fr).  
<https://www.education.gouv.fr/classes-bi-langues-et-sections-europeennes-ou-de-langues-orientales-selo-en-college-3986>
- Ministère de l'Education nationale et de la Jeunesse. (2015). *Décret n° 2015-372 du 31 mars 2015 relatif au socle commun de connaissances, de compétences et de culture* (MENE1506516D).  
<https://www.legifrance.gouv.fr/loda/id/JORFTEXT000030426718>
- Ministère de l'Education nationale et de la jeunesse. (2022). *L'Education au Développement Durable*.  
<https://www.education.gouv.fr/l-education-au-developpement-durable-7136>
- Ministère de l'Education nationale et de la jeunesse. (2023). *Les chiffres clés du système éducatif*.  
Ministère de l'Education Nationale et de la Jeunesse. <https://www.education.gouv.fr/les-chiffres-cles-du-systeme-educatif-6515>
- Ministère de l'Education nationale et de la jeunesse. (2024a). *La politique de l'éducation prioritaire : Les réseaux d'éducation prioritaire REP et REP +*. éducol.  
<https://eduscol.education.fr/1028/la-politique-de-l-education-prioritaire-les-reseaux-d-education-prioritaire-rep-et-rep>

- Ministère de l'Éducation nationale et de la jeunesse. (2024b). *Le diplôme national du brevet*. Ministère de l'Éducation Nationale et de la Jeunesse. <https://www.education.gouv.fr/le-diplome-national-du-brevet-10613>
- Mohan, L., Chen, J., & Anderson, C. W. (2009). Developing a multi-year learning progression for carbon cycling in socio-ecological systems. *Journal of Research in Science Teaching*, 46(6), 675-698.
- Molière. (1670). *Le bourgeois gentilhomme*.
- Moreau, G. (2022). *Classement des langues du monde par nombre total de locuteurs (L1 + L2)*. Atlasocio.com. <https://atlasocio.com/classements/langues/locuteurs/classement-langues-par-nombre-locuteurs-total-monde.php>
- Morin, E. (1982). *Science avec conscience*. Seuil.
- Morin, E. (1990). *Introduction à la pensée complexe* (2e Ed). Seuil.
- Mosna-Savoie, G. (Réalisateur). (2019, septembre 17). L'essentialisation [Émission]. In *Le Journal de la philosophie*. <https://www.radiofrance.fr/franceculture/podcasts/le-journal-de-la-philo/l-essentialisation-2178459>
- Mounin, G. (1981). Une sémiologie du système des signes de la chimie. *Diogène*, 114, 216-228.
- Musengimana, J., Kampire, E., & Ntawiha, P. (2022). Effect of Task-Based Learning on Students' Understanding of Chemical Reactions among Selected Rwandan Lower Secondary School Students. *Journal of Baltic Science Education*, 21(1), 140-155.
- Mzoughi-Khadhraoui, I., Dumon, A., & Ayadi-Trabelsi, M. (2013). Analyse comparative de pratiques enseignantes en situation de classe ordinaire lors du premier contact d'élèves tunisiens avec la modélisation de la transformation chimique. *Revista Electronica de Enseñanza de las Ciencias*, 12(3), 392-419.
- Nakiboğlu, C. (2023). Investigation of students' cognitive structures concerning the topic of physical and chemical changes : A cross-level study. *Chemistry Education Research and Practice*, 24(1), 89-107. <https://doi.org/10.1039/D2RP00142J>

- Németh, V., Orosz, G., Kovács, L., Somogyi, Z., & Korom, E. (2023). Guided inquiry-based learning in secondary-school chemistry classes : A case study. *Chemistry Education Research and Practice*, 24(1), 50-70. <https://doi.org/10.1039/D2RP00110A>
- Occident. (2012). In *CNRTL*. <https://www.cnrtl.fr/definition/occident>
- ONU. (s. d.). *Langues officielles de l'ONU | Nations Unies*. United Nations; United Nations. <https://www.un.org/fr/our-work/official-languages>
- Orange, C., & Orange, D. (1995). Géologie et biologie : Analyse de quelques liens épistémologiques et didactiques. *Aster*, 21, 27-49.
- Orange Ravachol, D. (2013). *Les SVT entre sciences et « éducations à » : Une mise à mal des principes qui structurent les savoirs ?* [Actes du congrès AREF 2013]. Université de Montpellier - LIRDEF.
- Orange Ravachol, D. (2014). Les « Educations à » et les sciences de la nature : Entre dédisciplinarisation et redisciplinarisation. *Education et socialisation*, 36, 1-15. <https://doi.org/10.4000/edso.903>
- Otero, M. R., Gazzola, M. P., Llanos, V. C., & Arlego, M. (2016). Co-disciplinary Physics and Mathematics Research and Study Course (RSC) within three study groups : Teachers-in-training, secondary school students and researchers. *Review of Science, Mathematics and ICT Education*, 10(2), 55-78. <https://doi.org/10.26220/rev.2315>
- Pagès, J. (2013). *Analyse factorielle multiple avec R*. EDP sciences.
- Pagnol, M. (1930). *Topaze*. éditions Fasquelles.
- Palmer, B., & Treagust, D. F. (1996). Physical and Chemical Change in Textbooks : An Initial View. *Research in Science Education*, 26(1), 129-140.
- Palmer, W. P. (2003). *A study of teaching and learning about the paradoxical concept of physical and chemical change* [thèse de doctorat]. Curtin University. <https://espace.curtin.edu.au/handle/20.500.11937/2634>

- Papageorgiou, G., Grammaticopoulou, M., & Johnson, P. M. (2010). Should we Teach Primary Pupils about Chemical Change? *International Journal of Science Education*, 32(12), 1647-1664.  
<https://doi.org/10.1080/09500690903173650>
- Paxao, M. F., & Cachapuz, A. (2000). Mass Conservation in Chemical Reactions : The Development of an Innovative Teaching Strategy Based on the History and Philosophy of Science. *Chemistry Education Research and Practice*, 1(2), 201-215.  
<https://doi.org/10.1039/A9RP90022E>
- Pedrosa, A. M., & Dias, H. M. (2000). Chemistry Textbook Approaches to Chemical Equilibrium and Student Alternative Conceptions. *Chemistry Education Research and Practice*, 1(2), 227-236.  
<https://doi.org/10.1039/A9RP90024A>
- Pekdağ, B., & Le Maréchal, J.-F. (2001). Apprentissage comparé de la notion de réaction chimique en TP ou à l'aide d'une vidéo : Rôle des observations faites par les élèves. *Skholé, Hors-série*, 129-141.
- Porlán Ariza, R., García García, E., Rivero García, A., & Martín del Pozo, R. (1998). Les obstacles à la formation professionnelle des professeurs en rapport avec leurs idées sur la science, l'enseignement en l'apprentissage. *Aster*, 26.  
[https://idus.us.es/bitstream/handle/11441/25535/Les\\_obstacles\\_%c3%a0\\_la\\_formation\\_professionnelle\\_des\\_professeurs\\_en\\_raport\\_avec\\_leurs\\_id%c3%a9es.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://idus.us.es/bitstream/handle/11441/25535/Les_obstacles_%c3%a0_la_formation_professionnelle_des_professeurs_en_raport_avec_leurs_id%c3%a9es.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- Pothen, A., & Rebulard, S. (2017). *SVT, sciences de la vie et de la Terre, 4e, cycle 4 nouveau programme*. Belin Education.
- Prieto, T., Watson, R., & Dillon, J. (1992). Pupils' understanding of combustion. *Research in Science Education*, 22(1), 331-340. <https://doi.org/10.1007/BF02356913>
- Puggian, C., Buarque de Morais Filho, Z., & Barbosa Lopes, C. V. N. (2013). Teaching chemical reactions in the laboratory : Linking theory and practice in teacher's education and didactic action. *Investigações Em Ensino de Ciências*, 17(3), 697-708.

- Rahayu, S., & Tytler, R. (1999). Progression in primary school children's conceptions of burning :  
Toward an understanding of the concept of substance. *Research in Science Education*, 29(3),  
295-312. <https://doi.org/10.1007/BF02461595>
- Ratcliffe, M. (1997). Pupil decision-making about socio-scientific issues within the science  
curriculum. *International Journal of Science Education*, 19(2), 167-182.  
<https://doi.org/10.1080/0950069970190203>
- Rebière, M., & Jaubert, M. (2009). Evolution des relations entre langage et sciences : De  
l'instrumentalisation à la collaboration. In P. Schneeberger & A. Vérin (Eds.), *Développer des  
pratiques d'oral et d'écrit en sciences : Quels enjeux pour les apprentissages à l'école ?* (p.  
49-71). INRP.
- Rees, S., Kind, V., & Newton, D. (2018). The Development of Chemical Language Usage by « Non-  
traditional » Students : The Interlanguage Analogy. *Research in science education*.  
<https://doi.org/10.1007/s11165-018-9801-0>
- Relais. (s. d.). In *CNRTL*. <https://www.cnrtl.fr/definition/relais>
- Resweber, J.-P. (2011). Les enjeux de l'interdisciplinarité. *Questions de communication*, 19, article 19.  
<https://doi.org/10.4000/questionsdecommunication.2661>
- Roberts, D. A. (1982). Developing the Concept of « Curriculum Emphases » in Science Education.  
*Science Education*, 66(2), 243-260.
- Roberts, D. A. (2007). Scientific Literacy/Science Literacy. In S. K. Abell & K. Appleton (Eds.),  
*Handbook of Research on Science Education*. Routledge.
- Roberts, D. A., & Bybee, R. W. (2014). Scientific Literacy, Science Literacy, and Science Education.  
In *Handbook of Research on Science Education* (Vol. 2, p. 559-572). Routledge.
- Rodrigues da Silva, D., Hübler, P. N., Perry, G., Santos, M. B., Carneiro, M. L. F., & Del Pino, J. C.  
(2016). Pensaqui : A Learning Object about Chemical Transformations. *Journal of Chemical  
Education*, 93(2), 387-390. <https://doi.org/10.1021/acs.jchemed.5b00764>

- Roßbegalle, T., & Ralle, B. (2016). Improving students' understanding of greenhouse effect, acid rain and the depletion of stratospheric ozone. *LUMAT: International Journal on Math, Science and Technology Education*, 4(1), article 1. <https://doi.org/10.31129/LUMAT.4.1.4>
- Ruffenach, M. (2017). *Physique chimie cycle 4, 5e, 4e, 3e programme 2016*. Bordas.
- Sadi-Yilmaz, S., Yildirim, A., & Ilhan, N. (2022). Effects of the Context-Based Learning Approach on the Teaching of Chemical Changes Unit. *Journal of Turkish Science Education*, 19(1), 218-236. <https://doi.org/10.36681/tused.2022.119>
- Salviat, B., & Girault, J. (2017). *SVT, sciences de la vie et de la Terre Cycle 4, 5e, 4e, 3e*. Magnard.
- Schlosser, S. E. (2012). Students' Perceptions, Attitudes, and Incorporation of Demonstrations, Popular Media Videos, and Animations Concerning Chemical Reactions [PhD thesis]. Purdue University. ProQuest LLC. [http://gateway.proquest.com/openurl?url\\_ver=Z39.88-2004&rft\\_val\\_fmt=info:ofi/fmt:kev:mtx:dissertation&res\\_dat=xri:pqm&rft\\_dat=xri:pqdiss:3545398](http://gateway.proquest.com/openurl?url_ver=Z39.88-2004&rft_val_fmt=info:ofi/fmt:kev:mtx:dissertation&res_dat=xri:pqm&rft_dat=xri:pqdiss:3545398)
- Schneuwly, B. (2016). Le concert des disciplines. Des réponses possibles aux questions posées du point de vue de l'interdisciplinarité. *Educateur*, 2, 6-9.
- Schramm, J. W., Jin, H., Keeling, E. G., Johnson, M., & Shin, H. J. (2018). Improved Student Reasoning About Carbon-Transforming Processes Through Inquiry-Based Learning Activities Derived from an Empirically Validated Learning Progression. *Research in Science Education*, 48(5), 887-911. <https://doi.org/10.1007/s11165-016-9584-0>
- Schubauer-Leoni, M.-L., & Leutenegger, F. (2002). Expliquer et comprendre dans une approche clinique/expérimentale du didactique ordinaire. *Raisons éducatives*, 227-251.
- Schubauer-Leoni, M.-L., & Leutenegger, F. (2003). Didactique comparée : Un champ de recherche émergeant dans le courant d'expression français. In D. Groux & S. Pérez (Eds.), *Dictionnaire d'éducation comparée* (p. 70-74). L'Harmattan.
- Schubauer-Leoni, M.-L., & Leutenegger, F. (2005). Une relecture des phénomènes transpositifs à la lumière de la didactique comparée. *Revue suisse des sciences de l'éducation*, 27(3), 407-429.

- Schubauer-Leoni, M.-L., Leutenegger, F., Ligozat, F., & Fluckiger, A. (2007). Un modèle de l'action conjointe professeur-élève : Les phénomènes didactiques qu'il peut/doit traiter. In G. Sensevy & A. Mercier (Eds.), *Agir ensemble. L'action didactique conjointe du professeur et des élèves* (p. 51-91). Presses Universitaires de Rennes.
- Schubauer-Leoni, M.-L., & Ntamakiliro, L. (1994). La construction de réponses à des problèmes impossibles. *Revue des sciences de l'éducation*, 20(1), 87-113.
- Scott, P. (1997). *Developing science concepts in secondary classrooms : An analysis of pedagogical interactions from a Vygotskian perspective* [PhD thesis]. University of Leeds.  
<https://theses.whiterose.ac.uk/483/>
- Scott, P., Asoko, H., & Leach, J. (2007). Student Conceptions and Conceptual Learning in Science. In S. K. Abell, K. Appleton, & D. L. Hanuscin (Eds.), *Handbook of Research on Science Education*. Routledge.
- Selco, J. I., Bruno, M., & Chan, S. (2012). Students Doing Chemistry : A Hand-On Experience for K-12. *Journal of Chemical Education*, 89(2), 206-210. <https://doi.org/10.1021/ed100632q>
- Sensevy, G. (1998). *Institutions didactiques. Etudes et autonomie à l'école élémentaire*. Presses Universitaires de France.
- Sensevy, G. (2001). Théories de l'action et action du professeur. In J.-M. Baudouin & J. Friedrich (Eds.), *Théories de l'action et éducation* (p. 203-224). De Boeck Supérieur.  
<https://www.cairn.info/theories-de-l-action-et-education---page-203.htm>
- Sensevy, G. (2007). Des catégories pour décrire et comprendre l'action didactique. In G. Sensevy & A. Mercier (Eds.), *Agir ensemble. L'action didactique conjointe du professeur et des élèves*. (p. 13-45). Presses Universitaires de Rennes.
- Sensevy, G. (2013). Filmer la pratique : Un point de vue de la théorie de l'action conjointe en didactique. *VISA. Instrumentation de la recherche en éducation*.  
<https://doi.org/10.4000/books.editionsmsmh.1930>
- Sensevy, G., & Mercier, A. (Eds.). (2007). *Agir ensemble. L'action didactique conjointe du professeur et des élèves*. Presses Universitaires de Rennes.

- Sensevy, G., Mercier, A., & Schubauer-Leoni, M.-L. (2000). Vers un modèle de l'action didactique du professeur à propos de la course à 20. *Recherches en didactique des mathématiques*, 20(3), 263-304.
- Sesto, V., & García-Rodeja, I. (2021). How Do Five- to Six-Year-Old Children Interpret a Burning Candle? *Education Sciences*, 11(5), article 5. <https://doi.org/10.3390/educsci11050213>
- Shepardson, D. P., Niyogi, D., Roychoudhury, A., & Hirsch, A. (2012). Conceptualizing climate change in the context of a climate system : Implications for climate and environmental education. *Environmental Education Research*, 18(3), 323-352.
- Simonneaux, J. (2011). *Les configurations didactiques des Questions Socialement Vives économiques et sociales* [HDR]. Université de Provence, Aix-Marseille. [https://oatao.univ-toulouse.fr/5289/1/Simonneaux\\_5289.pdf](https://oatao.univ-toulouse.fr/5289/1/Simonneaux_5289.pdf)
- Sjöström, J., & Eilks, I. (2018). Reconsidering Different Visions of Scientific Literacy and Science Education Based on the Concept of Bildung. In Y. J. Dori, Z. R. Mevarech, & D. R. Baker (Eds.), *Cognition, Metacognition, and Culture in STEM Education : Learning, Teaching and Assessment* (p. 65-88). Springer International Publishing. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-66659-4\\_4](https://doi.org/10.1007/978-3-319-66659-4_4)
- Sjöström, J., Frerichs, N., Zuin, V. G., & Eilks, I. (2017). Use of the concept of Bildung in the international science education literature, its potential, and implications for teaching and learning. *Studies in Science Education*, 53(2), 165-192. <https://doi.org/10.1080/03057267.2017.1384649>
- Slapničar, M., Tompa, V., Glažar, S. A., & Devetak, I. (2018). Fourteen-year-old students' misconceptions regarding the sub-micro and symbolic levels of specific chemical concepts. *Journal of Baltic Science Education*, 17(4), 620-632.
- 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*, 52(1), 177-214. <https://doi.org/10.3406/spira.2013.1067>

- Solomonidou, C., & Stavridou, H. (1994). Les transformations des substances, enjeu de l'enseignement de la réaction chimique. *Aster*, 18, 75-95.
- Soltani, K., & Khiari, J. (2023). Analyse de pratiques d'un enseignant Stagiaire du primaire dans une école urbaine Tunisienne lors de l'enseignement de Concept de la Réaction de Combustion. *Revue des recherches éducatives et didactique*, 12(1), 931-952.
- Stamovlasis, D., Kypraios, N., & Papageorgiou, G. (2015). A SEM Model in Assessing the Effect of Convergent, Divergent and Logical Thinking on Students' Understanding of Chemical Phenomena. *Science Education International*, 26(3), 284-306.
- Star, S. L. (2010). Ceci n'est pas un objet-frontière ! Réflexion sur l'origine d'un concept. *Revue d'anthropologie des connaissances*, 4(1), 18-35.
- Star, S. L., & Griesemer, J. R. (1989). Institutional Ecology, « Translations » and Boundary Objects : Amateurs and Professionals in Berkeley's Museum of Vertebrate Zoology. *Social Studies of Science*, 19(3), 387-420.
- Stavridou, H. (1990). Le concept de réaction chimique dans l'enseignement secondaire : Étude des conceptions des élèves [thèse de doctorat]. Université Paris 7.  
<http://www.theses.fr/1990PA077224>
- Stavridou, H., & Solomonidou, C. (1989). Physical phenomena--chemical phenomena : Do pupils make the distinction? *International Journal of Science Education*, 11(1), 83-92.  
<https://doi.org/10.1080/0950069890110108>
- Stein, M., Larrabee, T. G., & Barman, C. R. (2008). A study of common beliefs and misconceptions in physical science. *Journal of Elementary Science Education*, 20(2), 1-11.  
<https://doi.org/10.1007/BF03173666>
- Submicroscopique. (2012). In *CNRTL*. <https://www.cnrtl.fr/definition/submicroscopique>
- Sudriès, M. (2019). *Pratiques langagières et conceptualisation de la transformation chimique : Une analyse du discours chez des élèves de cycle 4* [mémoire de Master]. Université de Montpellier.

- Sudriès, M., & Cross, D. (sous presse). Pratiques déclarées d'enseignantes de chimie sur l'enseignement des problèmes environnementaux au cycle 4. *RDST*.
- Sudriès, M., Ligozat, F., & Cross, D. (2023). Les enjeux de l'enseignement-apprentissage de la transformation chimique au secondaire I : regards croisés sur les prescriptions officielles et ressources formelles en Suisse romande et en France. *Revue suisse des sciences de l'éducation*, 45(1), 64-82. <https://doi.org/10.24452/sjer.45.1.6>
- Swinehart, D. F. (1985). More on Chemical Reaction Balancing. *Journal of Chemical Education*, 62(1), 55. <https://doi.org/10.1021/ed062p55>
- Synchrétique. (2012). In *CNRTL*. <https://www.cnrtl.fr/definition/syncr%C3%A9tique>
- Taber, K. S. (2001). Building the structural concepts of chemistry : Some considerations from the education research. *Chemistry Education Research and Practice*, 2(2), 123-158.
- Taber, K. S. (2012). Introducing chemical change and chemical bonding. In K. S. Taber (Ed), *Teaching Secondary Chemistry* (2e ed, p. 75-101). Hodder Education.
- Taber, K. S. (2013). Revisiting the chemistry triplet : Drawing upon the nature of chemical knowledge and the psychology of learning to inform chemistry education. *Chemistry Education Research and Practice*, 14(2), 156-168. <https://doi.org/10.1039/C3RP00012E>
- Taber, K. S. (2018). Representations and visualisation in teaching and learning chemistry. *Chemistry Education Research and Practice*, 19(2), 405-409. <https://doi.org/10.1039/C8RP90003E>
- Taber, K. S. (2020). Conceptual confusion in the chemistry curriculum : Exemplifying the problematic nature of representing chemical concepts as target knowledge. *Foundations of Chemistry*, 22(2), 309-334. <https://doi.org/10.1007/s10698-019-09346-3>
- Talanquer, V. (2011). Macro, Submicro, and Symbolic : The many faces of the chemistry "triplet". *International Journal of Science Education*, 32(2), 179-195.
- Taskin, V., & Bernholt, S. (2014). Students' Understanding of Chemical Formulae : A review of empirical research. *International Journal of Science Education*, 36(1), 157-185. <https://doi.org/10.1080/09500693.2012.744492>

- Thomas, G. P., & McRobbie, C. J. (2013). Eliciting Metacognitive Experiences and Reflection in a Year 11 Chemistry Classroom : An Activity Theory Perspective. *Journal of Science Education and Technology*, 22(3), 300-313.
- Tiberghien, A. (1994). Modeling as a basis for analyzing teaching-learning situations. *Learning and Instruction*, 4(1), 71-87. [https://doi.org/10.1016/0959-4752\(94\)90019-1](https://doi.org/10.1016/0959-4752(94)90019-1)
- Tiberghien, A., Malkoun, L., & Seck, M. (2008). Analyse des pratiques de classes de physique : Aspects théoriques et méthodologiques. *Les dossiers des sciences de l'éducation*, 19, 61-79.
- Tiberghien, A., Psillos, D., & Koumaras, P. (1994). Physics instruction from epistemological and didactical bases. *Instructional Science*, 22(6), 423-444. <https://doi.org/10.1007/BF00897977>
- Tiberghien, A., & Sensevy, G. (2012). The Nature of Video Studies in Science Education : Analysis of Teaching & Learning Processes. In D. Jorde & J. Dillon (Eds.), *Science Education Research and Practice in Europe : Retrospective and Prospective* (p. 141-179). Sense Publishers.
- Tiberghien, A., & 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.
- Timofte, R. S. (2015). Content Analysis of Chemistry Curricula in Germany Case Study : Chemical Reactions. *Acta Didactica Napocensia*, 8(4), 25-32.
- Tonnetti, B., & Lentillon-Kaestner, V. (2023). Teaching interdisciplinarity in secondary school : A systematic review. *Cogent Education*, 10(1). <https://doi.org/10.1080/2331186X.2023.2216038>
- Touli, E. H., Talbi, M., & Radid, M. (2012). Teaching-Learning of Chemistry : Analysis of Representations of Learners on the Modeling of Chemical Transformation. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 46, 47-52. <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2012.05.065>
- Trellu, J.-L., & Toussaint, J. (1986). La conservation, un grand principe. *Aster*, 2(1), 43-87. <https://doi.org/10.4267/2042/9194>
- UNESCO. (1994). *The Project 2000+ Declaration : The way forward*. <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000097743>
- UNESCO. (2002). *L'Education relative à l'environnement : Possibilités et contraintes*. [https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000146295\\_fre](https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000146295_fre)

- UNESCO. (2011). *Classification Internationale Type de l'Éducation, CITE 2011* (UIS/2012/INS/10).  
UNESCO. <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000220879>
- UNESCO. (2016). *Education 2030 : Déclaration d'Incheon et Cadre d'action pour la mise en œuvre de l'Objectif de développement durable 4 : Assurer à tous une éducation équitable, inclusive et de qualité et des possibilités d'apprentissage tout au long de la vie* (UIS/2012/INS/10).  
[https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000245656\\_fre](https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000245656_fre)
- UNESCO. (2021). *Berlin Declaration on Education for Sustainable Development*.  
<https://en.unesco.org/sites/default/files/esdfor2030-berlin-declaration-en.pdf>
- United Nations Statistical Commission. (2020). *A recommendation on the method to delineate cities, urban and rural areas for international statistical comparisons*. United Nations.  
<https://unstats.un.org/unsd/statcom/51st-session/documents/>
- Ürek, H., & Dolu, G. (2020). A case study utilizing the cognitive structures of exceptionally talented students regarding chemical change via word association. *Gifted Education International*, 36(1), 50-70. <https://doi.org/10.1177/0261429419888895>
- Urgelli, B. (2008). Education aux risques climatiques. Premières analyses d'un dispositif pédagogique interdisciplinaire. *Aster*, 46, 97-121. <https://doi.org/10.4267/2042/20032>
- Valade, B. (1999). Le « sujet » de l'interdisciplinarité. *Sociologie et sociétés*, 31(1), 11-21.  
<https://doi.org/10.7202/001814ar>
- van Berkel, B. (2005). *The structure of current school chemistry. A quest for conditions for escape*. Joh. Emschedè.
- van Driel, J. H., Bulte, A. M. W., & Verloop, N. (2005). The conceptions of chemistry teachers about teaching and learning in the context of a curriculum innovation. *International Journal of Science Education*, 27(3), 303-322. <https://doi.org/10.1080/09500690412331314487>
- van Driel, J. H., de Vos, W., Verloop, N., & Dekkers, H. (1998). Developing secondary students' conceptions of chemical reactions : The introduction of chemical equilibrium. *International Journal of Science Education*, 20(4), 379-392. <https://doi.org/10.1080/0950069980200401>

- Vergnaud, G. (1990). La théorie des champs conceptuels. *Recherches en didactique des mathématiques*, 10(1), 1-15.
- Vergnaud, G. (1991). Langage et pensée dans l'apprentissage des mathématiques. *Revue française de pédagogie*, 96(1), 79-86. <https://doi.org/10.3406/rfp.1991.1350>
- Vérin, A. (1998). Enseigner de façon constructiviste, est-ce faisable ? *Aster : Recherches en didactique des sciences expérimentales*, 26(1), 133-163. <https://doi.org/10.4267/2042/8695>
- Vermersch, P. (1991). L'entretien d'explicitation. *Les cahiers de Beaumont*, 52bis-53, 63-70.
- Verret, M. (1975). *Le temps des études* (1-2). Librairie Honoré Champion.
- Vygotski, L. (2019). *Pensée et langage* (5e Ed). La dispute.
- Waterman, E. L., & Bilsing, L. M. (1983). Chemistry for Kids : A Unique Demonstration Show for the Elementary School Classroom. *Journal of Chemical Education*, 60(5), 415-416. <https://doi.org/10.1021/ed060p415>
- Weninger, J. (1982). Fundamental remarks on so-called reaction equations. *European Journal of Science Education*, 4(4), 391-396. <https://doi.org/10.1080/0140528820040405>
- Winterton, N. (2016). Green chemistry : Deliverance or distraction? *Clean Technologies and Environmental Policy*, 18(4), 991-1001. <https://doi.org/10.1007/s10098-016-1118-y>
- Woods, D. K. (2019). *Transana Professional* (Version 3.32d) [Logiciel]. University of Wisconsin-Madison Centre of Education Research. <https://www.transana.com/>
- Yan, F., & Talanquer, V. (2015). Students' Ideas about How and Why Chemical Reactions Happen : Mapping the conceptual landscape. *International Journal of Science Education*, 37(18), 3066-3092. <https://doi.org/10.1080/09500693.2015.1121414>
- Yildirim, H., & Demirkol, H. (2018). Identifying mental models of students for physical and chemical change. *Journal of Baltic Science Education*, 17(6), 986-1004. <https://doi.org/10.33225/jbse/18.17.986>
- You, H. S., Marshall, J. A., & Delgado, C. (2021). Toward Interdisciplinary Learning : Development and Validation of an Assessment for Interdisciplinary Understanding of Global Carbon

Cycling. *Research in Science Education*, 51(5), 1197-1221. <https://doi.org/10.1007/s11165-019-9836-x>

- Younis, B. K. (2017). The Effects of Scientific Inquiry Simulations on Students' Higher Order Thinking Skills of Chemical Reaction and Attitude towards Chemistry. *American Journal of Educational Research*, 5(11), 1158-1161. <https://doi.org/10.12691/education-5-11-7>
- Yuan, E. (2024). *Zoom* (Version 6.1.11) [Logiciel]. Zoom Video Communication. <https://zoom.us/>
- Zangori, L., Peel, A., Kinslow, A., Friedrichsen, P., & Sadler, T. (2017). Student Development of Model-Based Reasoning About Carbon Cycling and Climate Change in Socio-Scientific Issues Unit. *Journal of Research in Science Teaching*, 54(10), 1249-1273.
- Zeidler, D. L. (2014). Socioscientific issues as a curriculum emphasis : Theory, research and practice. In N. G. Lederman & S. K. Abell (Eds.), *Handbook of research on science education: Vol. II* (p. 697-726). Routledge.
- Zeidler, D. L., & Sadler, T. D. (2008). The role of moral reasoning in argumentation : Conscience, character ad care. In S. Erduran & M. P. Jimenez-Aleixandre (Eds.), *Argumentation in science education : Perspectives from classroom-based research* (p. 201-216). Springer Press.

## TABLE DES EXTRAITS

Extrait 1: entretien ante-observations avec Aurélie (phase 1) [19 : 07 à 19 : 44].....	147
Extrait 2: entretien ante-observations 2 avec Aurélie (phase 2) [06 : 29 à 08 : 08].....	151
Extrait 3:entretien post-observations avec Henri (phase 1) [00 : 42 à 01 : 00] .....	163
Extrait 4: entretien post-observations avec Henri (phase 1) [01 : 25 à 01 : 58].....	164
Extrait 5: « l'électrolyse de l'eau » Nino — phase 2 — séance 2 [21 :15 à 24 :00].....	170
Extrait 6: extrait de l'entretien post-observations avec Nino (phase 1) [06 : 54 à 07 : 42].....	173
Extrait 7: « réaction chimique et anthropocène » Nino — phase 2 — séance 3 [01 :03 :00 à 01 :04 :00] .....	176
Extrait 8: extrait de l'entretien ante-observations 2 avec Nino (phase 2) [01 :15 :23 à 01 :15 :36]....	178
Extrait 9: extrait de l'entretien ante-observations 1 avec Nino (phase 2) [25 : 38 à 26 : 38].....	179
Extrait 10: « centrale thermique et réchauffement climatique » Gauthier — phase 1 — séquence « Des problèmes environnementaux » — séance 3 [02 :53 à 06 :01].....	182
Extrait 11: extrait de l'entretien post-observations de la séquence 6 « Des problèmes environnementaux » avec Gauthier (phase 1) [03 : 53 à 04 : 24].....	185
Extrait 12: extrait de l'entretien post-observation de la séquence 3 « Des atomes et des molécules dans ma cuisine » avec Gauthier (phase 1) [08 : 19 à 08 : 37] .....	185
Extrait 13: « cycle du carbone et étude de la complexité » Gauthier — phase 2 — séquence « L'impact de l'être humain sur le cycle du carbone » — séance 2 [53 :55 à 58 :07].....	189
Extrait 14: extrait de l'entretien post-observations avec Gauthier (phase 2) [01 : 39 à 02 : 33] et [36 : 51 à 37 : 12].....	194
Extrait 15: « cycle du carbone et contextualisation » chez Gauthier (phase 2 — séquence « Cycle du carbone et empreinte carbone » — séance 5) [14 : 44 à 22 : 58].....	205
Extrait 16: entretien post-observations avec E12 — Classe de Gauthier (phase 2) [07 : 47 à 08 : 09]	218
Extrait 17: entretien post-observations avec E11 — classe de Gauthier (phase 2) [06 : 39 à 07 : 09].	218
Extrait 18: entretien post-observations avec E11 — Classe de Gauthier (phase 1 — séquence 6 « Des problèmes environnementaux ») [00 : 42 à 01 : 41].....	220
Extrait 19: « un cycle du carbone déséquilibré » chez Aurélie (phase 2 — séance 1) [33 : 19 à 36 : 31] .....	224
Extrait 20: extrait de l'entretien post-observations avec Aurélie (phase 2) [07 : 49 à 08 : 01] .....	227
Extrait 21: extrait de l'entretien post-observations avec Aurélie (phase 2) [09 : 27 à 10 : 12] .....	228
Extrait 22: « respiration et pain au chocolat » Nino — phase 2 — séance 3 [54 : 10 à 59 : 00].....	233
Extrait 23: « la photosynthèse » chez Nino (phase 2 — séance 2) [00 :59 : 00 à 01 : 02 : 58 ] .....	238
Extrait 24: « produire de l'énergie » chez Nino (phase 2 — séance 3) [01 : 04 : 07 à 01 : 04 : 43]....	242
Extrait 25: « cycle du carbone et conservation de la matière » chez Henri (phase 2 — séance 3) [45 : 49 à 51 : 52].....	251
Extrait 26: extrait de l'entretien post-observations avec Henri (phase 2) [05 : 49 à 07 : 02].....	257
Extrait 27: extrait de l'entretien post-observations ave Henri (phase 2) [09 : 25 à 09 : 56].....	257
Extrait 28: entretien post-observations avec E11 — Classe d'Henri (phase 2) [06 : 15 à 06 : 46].....	260
Extrait 29: : entretien post-observations avec E12 — Classe d'Henri (phase 2) [08 : 54 à 09 : 57]....	261
Extrait 30: « combustions et anthropocène » chez Aurélie (phase 2 — séance 5) [48 : 36 à 51 : 10].	263

Extrait 31: entretien post-observations avec E11 — Classe d’Aurélie (phase 2) [07 : 26 à 08 : 38] ...	270
Extrait 32: entretien post-observations avec E12 — Classe d’Aurélie (phase 2) [13 : 42 à 14 : 43] ...	271
Extrait 33: Nino phase 2 — séance 3 [01 : 04 : 07 à 01 : 04 : 43].....	281

## TABLE DES FIGURES

Figure 1 : répartition des publications en fonction de la langue de rédaction .....	23
Figure 2 : répartition des publications par continent .....	23
Figure 3 : nombre de publications par pays.....	24
Figure 4 : répartition des publications en fonction du temps .....	25
Figure 5 : répartition des publications par catégories de sujets .....	26
Figure 6 : répartition des publications portant sur les conceptions des élèves en fonction des pays ....	27
Figure 7 : nombre de publications par sujet et par décennie .....	30
Figure 8 : triangle de Johnstone (1993, p. 3).....	32
Figure 9 : schéma de la modélisation en science selon Martinand (1998, p. 10).....	33
Figure 10 : schéma de la modélisation en chimie selon Laugier et Dumon (2003, p. 73) .....	34
Figure 11 : schéma de la modélisation en physique selon Tiberghien et Vince (2005, p. 6).....	34
Figure 12 : schéma de la modélisation en chimie selon Le Maréchal et Bécu-Robinault (2006, p. 86)	35
Figure 13 : schéma de la modélisation des transformations chimiques au lycée selon Kermen (2018, p. 57).....	36
Figure 14 : relation sémiotique triadique, d’après Kermen (2022, p. 58) .....	36
Figure 15 : double relation sémiotique pour le nom chimique « méthane », d’après Kermen (2022, p.65) .....	37
Figure 16 : schéma de la modélisation de l’évolution des systèmes chimiques au lycée selon Kermen (2018, p. 52) .....	38
Figure 17: modélisation de la combustion du carbone au secondaire I.....	39
Figure 18 : extrait d’un document de cours à destination des élèves élaboré par un enseignant genevois .....	41
Figure 19 : schéma de la modélisation de la transformation chimique au secondaire I .....	42
Figure 20 : illustration de la mise en évidence expérimentale des produits de la combustion du carbone dans un manuel (Daujean, 2017, p. 160).....	43
Figure 21 : organisation du PER en domaines disciplinaires, d’après CIIP (2010b) .....	52
Figure 22 : organisation de la partie « Sciences de la nature » de domaine MSN du PER en thématiques, .....	53
Figure 23 : organisation des disciplines scolaires au cycle 4 (MEN, 2020, p. 1).....	53
Figure 24 : exercice issu du manuel de physique-chimie Ruffenach (2017, p. 105).....	57
Figure 25 : activité d’étude documentaire du manuel Gardarein (2017, p. 72).....	58
Figure 26 : question 3 de la partie 2 du questionnaire.....	62
Figure 27 : question 2 de la partie 3 du questionnaire.....	62
Figure 28 : question 6 de la partie 4 du questionnaire.....	63
Figure 29 : répartition des individus selon leur âge .....	64
Figure 30 : répartition des individus selon leurs années d’enseignement .....	64

Figure 31: répartition des individus selon leur académie de formation.....	65
Figure 32 : résultat de la CHCP.....	65
Figure 33 : exemple de « croisements entre enseignements » proposés dans le programme de physique-chimie (MEN, 2018, p.118).....	75
Figure 34 : exemple de lien suggéré dans les chapeaux des domaines du PER MSN 36 (surligné en gris en haut de la page) (CIIP, 2010d, p. 5).....	75
Figure 35 : gradient de problématicité d'après Fabre (2021, p. 95).....	78
Figure 36 : photographie de la Piedra Movediza à Tandil (Argentine) à partir de laquelle le problème codisciplinaire est construit.....	80
Figure 37 : cycle du carbone quantifiant l'influence des activités humaines sur la production de dioxyde de carbone atmosphérique (unité des flux : gigatonnes de carbone/an ; unité des stocks : gigatonnes de carbone) (IPCC, 2013).....	84
Figure 38 : schéma d'un objet-frontière.....	86
Figure 39 : schématisation d'un objet-relais faisant le lien entre deux communautés disciplinaires....	87
Figure 40 : exemple d'exercice des MER MSN 38 (CIIP, 2010e).....	90
Figure 41 : relation entre les concepts scientifiques contribuant à comprendre l'origine anthropique du réchauffement climatique.....	92
Figure 42 : cycle du carbone d'après Mohan et al. (2009, p. 677).....	93
Figure 43 : le système didactique, d'après Chevallard (1991, p. 23).....	99
Figure 44 : systèmes didactiques et sur-systèmes, d'après Chevallard (1991, p. 24).....	100
Figure 45 : descripteurs de l'action didactique conjointe.....	110
Figure 46 : niveaux de détermination didactique (Chevallard, 2002, p. 10).....	111
Figure 47 : mise en relation des différentes descriptions des déterminants de l'action.....	113
Figure 48 : attributs du savoir scientifique et modalités dominantes (Simonneaux, 2011, p. 91).....	115
Figure 49 : postures épistémologiques et rapport aux sciences induit (Simonneaux, 2011, p. 117)....	115
Figure 50 : stratégies didactiques et quelques-unes de leurs caractéristiques (Simonneaux, 2011, p. 144).....	115
Figure 51 : plan d'une des classes observées avec position des deux caméras.....	123
Figure 52 : dispositif d'observation sur deux ans.....	124
Figure 53 : deux boucles d'observables chez Gauthier en phase 1 d'observations (année 1).....	125
Figure 54 : représentations du cycle du carbone holocène (gauche) et anthropocène (droite) proposées aux enseignants et à l'enseignante de physique-chimie.....	127
Figure 55 : document issu des MER de géographie « 10aB- L'Homme influence-t-il l'effet de serre ? » (CIIP, 2010a).....	128
Figure 56 : organisation du dispositif de recueil de données dans le temps.....	130
Figure 57 : organisation des dispositifs de recueil de données entre la France et la Suisse romande .	131
Figure 58 : empan de l'échelle macroscopique et nombre de séances par séquence pour chaque sujet enseignant.....	132
Figure 59 : emboîtement des trois échelles d'analyses.....	133
Figure 60 : extrait d'une transcription (Aurélié — phase 1 — séance 2).....	134
Figure 61 : extrait d'une transcription illustrée par une capture d'écran (Aurélié — phase 1 — séance 3).....	134
Figure 62 : exemple de synopsis de séquence chez Nino (phase 1).....	136

Figure 63 : extrait de synopsis de séance chez Nino (phase 1 — séance 1).....	137
Figure 64 : relation sémiotique triadique, d’après Kermen (2022, p. 58) .....	139
Figure 65 : schéma de la modélisation de la transformation chimique au secondaire I .....	139
Figure 66 : théorie des deux mondes de Tiberghien et Vince (2005, p. 6) .....	140
Figure 67 : trois dimensions articulées des configurations didactiques (Simonneaux, 2011, p. 145 ..	141
Figure 68 : modèles archétypaux des configurations didactiques (Simonneaux, 2011, p. 148).....	142
Figure 69 : schéma bilan des étapes de la méthodologie.....	143
Figure 70 : synopsis de la séquence « De la transformation chimique à l’équation de réaction » d’Aurélié (phase 1) .....	148
Figure 71 : comparaison des enjeux de séquences entre les phases 1 et 2 chez Aurélié .....	149
Figure 72 : synopsis de la séquence « Matière et transformations » de Nino (phase 1)60) Ch : oui oui oui c’est sûr, mais hum tu vois j’trouve que sur ce schéma il permet aussi de partir des phénomènes parce que tu vois on voit bien heu ben que vraisemblablement l’usine heu elle rejette quelque chose et puis heu comme tu dis après on va ça amène à parler du co2 etc et que ça fait une bonne entrée en matière pour heu pour introduire ce ce modèle de la réaction que tu vas ensuite toi heu heu nommer pas vraiment nommer puisque tu vas utiliser l’équation de réaction etc sans dire que c’est la le modèle de la réaction en parlant de transformation / mais heu moi j’trouve ça pas mal de commencer par le cycle alors heu après il faut que tu sois suffisamment à l’aise toi avec ton organisation pour heu.....	150
Figure 73 : synopsis de la séquence « Matière et transformations » de Nino (phase 1).....	152
Figure 74: comparaison des enjeux de séquences entre les phases 1 et 2 chez Nino .....	154
Figure 75 : document d’auto-évaluation de la séquence « Des atomes et des molécules dans ma cuisine » de Gauthier distribué aux élèves.....	156
Figure 76 : extraits des introductions des trois activités de la séquence de Gauthier.....	156
Figure 77 : synopsis de la séquence « Des atomes et des molécules dans ma cuisine » de Gauthier (phase 1) .....	157
Figure 78 : programmation de Gauthier 2021-2022 pour les classes de 4e.....	157
Figure 79 : document d’auto-évaluation de la séquence « Des problèmes environnementaux » distribué aux élèves .....	158
Figure 80 : synopsis de la séquence « Des problèmes environnementaux » de Gauthier (phase 1)....	159
Figure 81 : programmation de Gauthier 2022-2023 pour les classes de 4 <sup>e</sup> .....	159
Figure 82 : documents d’auto-évaluation des séquences 1 (haut) et 2 (bas) de Gauthier distribués aux élèves.....	160
Figure 83 : comparaison des enjeux de séquences entre les phases 1 et 2 chez Gauthier .....	161
Figure 84 : synopsis de la séquence « Transformations physiques et chimiques » d’Henri (phase 1) 163	
Figure 85 : comparaison des enjeux des séquences entre les phases 1 et 3 chez Henri .....	166
Figure 86 : extrait du synopsis de la séance 2 — phase 2 chez Nino .....	168
Figure 87 : Nino représente l’équation de réaction d’électrolyse de l’eau par des briques de Lego® 168	
Figure 88 : Nino rappelle les différences de volumes de gaz produits dans les cuves à électrolyse ... 168	
Figure 89 : extrait du synopsis de la séance 1 — phase 1 chez Nino .....	169
Figure 90 : configuration didactique construite à partir de l’extrait « l’électrolyse de l’eau ».....	174
Figure 91 : extrait du synopsis de la séance 3 — phase 2 chez Nino .....	175
Figure 92 : Nino explique les effets de la déforestation en pointant les flèches représentant la photosynthèse (haut) et la combustion des arbres (bas) sur le cycle du carbone .....	177

Figure 93 : configuration didactique reconstruite à partir de l'extrait « réaction chimique et anthropocène ».....	179
Figure 94 : extrait du synopsis de la séance 4 — phase 1 — séquence « Des problèmes environnementaux » chez Gauthier .....	180
Figure 95 : cycle du carbone mettant en évidence le phénomène des pluies acides, extrait de l'activité 6.3 « Dioxyde de carbone et environnement » de Gauthier (phase 1).....	182
Figure 96 : modélisation de l'effet de serre, extrait de l'activité 6.3 « Dioxyde de carbone et environnement » de Gauthier (phase 1).....	182
Figure 97 : configuration didactique reconstruite à partir de l'extrait « centrale thermique et réchauffement climatique » .....	186
Figure 98 : extrait du synopsis de la séance 2 — phase 2 — séquences « L'impact de l'être humain sur le cycle du carbone » chez Gauthier .....	187
Figure 99 : exemples de questions de l'activité « Émission de gaz à effet de serre » pour les pistes vertes, bleues et rouges .....	190
Figure 100 : résumé du fonctionnement des centrales thermiques extrait du document « piste bleue » de Gauthier.....	190
Figure 101 : modélisation de l'effet de serre extraite du document « piste bleue » de Gauthier.....	190
Figure 102 : configuration didactique reconstruite à partir de l'extrait « cycle du carbone et étude de la complexité » .....	194
Figure 103 : illustration de l'articulation des modèles disciplinaires pour l'étude de la complexité chez Gauthier.....	197
Figure 104 : synopsis de la séquence 1 « Cycle du carbone et empreinte carbone » de Gauthier en phase 2 .....	201
Figure 105 : synopsis de la séquence 2 « L'impact de l'être humain sur le cycle du carbone » de Gauthier en phase 2 .....	202
Figure 106 : extrait du synopsis de la séance 5 — séquence 1 « Cycle du carbone et empreinte carbone » chez Gauthier (phase 2).....	202
Figure 107 : représentation du cycle du carbone holocène quantifié .....	206
Figure 108 : extrait du document de l'activité 1.3 « Où va le carbone dans le cycle du carbone ? » (piste rouge) de Gauthier.....	207
Figure 109: représentation du cycle du carbone anthropocène quantifié proposée à Gauthier (non présentée aux élèves).....	211
Figure 110 : configuration didactique reconstruite à partir de l'extrait « cycle du carbone et contextualisation ».....	212
Figure 111 : schéma de la mise en œuvre de la codisciplinarité chez Gauthier (phase 2).....	214
Figure 112 : tableau récapitulatif des critères de codisciplinarité reconstruits à travers les séquences de Gauthier (phase 2) .....	215
Figure 113 : relation entre les concepts scientifiques contribuant à comprendre l'origine anthropique du réchauffement climatique .....	216
Figure 114 : illustrations utilisées en entretiens post-observations avec les élèves en phase 2.....	217
Figure 115 : synopsis de la séquence d'Aurélié en phase 2 .....	221
Figure 116 : extrait du synopsis de la séance 1 d'Aurélié (phase 2) .....	222

Figure 117 : tableau récapitulatif des critères de codisciplinarité reconstruits à travers l'extrait « un cycle du carbone déséquilibré » chez Aurélie (phase 2) .....	227
Figure 118 : configuration didactique reconstruite à partir de l'extrait « un cycle du carbone déséquilibré ».....	229
Figure 119 : synopsis de la séquence de Nino en phase 2 .....	230
Figure 120 : extrait du synopsis de la séance 3 de Nino (phase 2).....	231
Figure 121 : extrait des MER MSN38 (biologie) (CIIP, 2010e) .....	238
Figure 122 : extrait des MER MSN38 (CIIP, 2010e) .....	240
Figure 123 : reconstruction de la configuration didactique à partir des extraits « respiration et pain au chocolat » et « la photosynthèse » .....	244
Figure 124 : schéma de la mise en œuvre de la codisciplinarité chez Nino (phase 2) .....	246
Figure 125 : tableau récapitulatif des indicateurs de codisciplinarité reconstruits à partir de la séquence de Nino (phase 2) .....	247
Figure 126 : synopsis de la séquence d'Henri en phase 2 .....	248
Figure 127 : extrait du synopsis de la séance 3 chez Henri (phase 2) .....	249
Figure 128 : cycle du carbone anthropocène quantifié utilisé par Henri.....	253
Figure 129 : reconstruction de la configuration didactique pour l'extrait « cycle du carbone et conservation de la matière » .....	258
Figure 130 : schéma de la mise en œuvre de la codisciplinarité chez Henri (phase 2) .....	259
Figure 131 : tableau récapitulatif des indicateurs de codisciplinarité reconstruits à partir de la séquence d'Henri (phase 2).....	260
Figure 132 : extrait du synopsis de la séance 5 d'Aurélie (phase 2) .....	262
Figure 133 : tableau récapitulatif de la définition des indicateurs de codisciplinarité pour l'extrait « combustions et anthropocène » chez Aurélie (phase 2).....	265
Figure 134 : construction de la configuration didactique pour l'extrait « combustions et anthropocène » .....	266
Figure 135 : schéma de la mise en œuvre de la codisciplinarité chez Aurélie (phase 2).....	268
Figure 136 : représentation du modèle générique de la codisciplinarité au service de l'étude d'un problème complexe .....	273
Figure 137 : conditions de mise en œuvre de la codisciplinarité selon les trois pôles du système didactique .....	292

## **TABLE DES TABLEAUX**

Tableau 1: mots-clefs utilisés pour la recherche bibliographique .....	22
Tableau 2: comparaison des études sur les curricula de sciences .....	47
Tableau 3: comparaison des études anglophones et francophones sur les curricula de chimie.....	49