



HAL
open science

MODÈLES ET MODÉLISATION DANS L'ENSEIGNEMENT DE LA CHIMIE : D'UNE ANALYSE ÉPISTÉMOLOGIQUE ET DIDACTIQUE À L'ÉTUDE DES PRATIQUES ENSEIGNANTES

Isabelle Kermen

► **To cite this version:**

Isabelle Kermen. MODÈLES ET MODÉLISATION DANS L'ENSEIGNEMENT DE LA CHIMIE : D'UNE ANALYSE ÉPISTÉMOLOGIQUE ET DIDACTIQUE À L'ÉTUDE DES PRATIQUES ENSEIGNANTES. Education. université Paris Diderot Paris 7, 2016. tel-02883037

HAL Id: tel-02883037

<https://hal.science/tel-02883037v1>

Submitted on 16 Feb 2023

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.

UNIVERSITÉ PARIS DIDEROT

UFR DE CHIMIE

NOTE DE SYNTHÈSE POUR L'HABILITATION À DIRIGER DES RECHERCHES

**MODÈLES ET MODÉLISATION DANS L'ENSEIGNEMENT DE LA CHIMIE : D'UNE ANALYSE
ÉPISTÉMOLOGIQUE ET DIDACTIQUE À L'ÉTUDE DES PRATIQUES ENSEIGNANTES**

Présentée par Isabelle Kermen

Jury :

Souad Ammar-Merah, professeure, Université Paris Diderot (France) : examinatrice

Cécile de Hosson, professeure, Université Paris Diderot (France) : examinatrice

Mercè Izquierdo-Aymerich, professeure émérite, Universitat Autònoma de Barcelona (Espagne) :
examinatrice

Ludovic Morge, professeur, Université Blaise-Pascal Clermont-Ferrand (France) : rapporteur

Benoit Piro, professeur, Université Paris Diderot (France) : rapporteur

Patrice Venturini, professeur, Université de Toulouse 2 (France) : rapporteur

Le 06 décembre 2016

LABORATOIRE DE DIDACTIQUE ANDRÉ REVUZ

Sommaire

| | |
|---|-----------|
| Résumé des recherches | 6 |
| Analyse épistémologique et didactique du thème des transformations chimiques de la matière..... | 7 |
| Clarification épistémologique et didactique..... | 7 |
| Analyse de raisonnements d'élèves en classe..... | 7 |
| Un regard didactique sur l'activité d'enseignants en chimie..... | 8 |
| Appropriation d'un cadre d'analyse des pratiques..... | 8 |
| Caractérisation de l'activité d'enseignants en classe de chimie..... | 9 |
| Les PCK, un facteur de la composante personnelle des pratiques..... | 9 |
| Perspectives de recherche..... | 9 |
| Exposé synthétique des recherches | 11 |
| Introduction | 12 |
| Partie A Approche épistémologique et didactique | 15 |
| Chapitre I Réflexions épistémologiques et didactiques autour des transformations chimiques de la matière..... | 15 |
| I.1. Place des modèles dans l'enseignement de la chimie..... | 15 |
| I.1.1. Le contexte antérieur aux programmes de lycée 2000-2002..... | 16 |
| I.1.2. Le programme de chimie 2000-2002 du lycée..... | 16 |
| I.1.2.1. Les intentions des auteurs du programme..... | 17 |
| I.1.2.2. Les contenus chimiques objets de changements majeurs..... | 17 |
| I.2. Qu'entend-on par modèle dans l'enseignement des sciences ?..... | 19 |
| I.2.1. Regard épistémologique..... | 19 |
| I.2.1.1. Définir un modèle..... | 19 |
| I.2.1.2. Réalité et réalisme scientifique..... | 20 |
| I.2.1.3. Théorie et modèle..... | 21 |
| I.2.1.4. Quelle relation entre modèle et réalité ?..... | 22 |
| I.2.1.5. Les fonctions des modèles scientifiques..... | 22 |
| I.2.2. Les modèles scientifiques scolaires..... | 23 |
| I.3. Approches des modèles et de la modélisation dans les recherches sur l'enseignement de la chimie..... | 25 |
| I.3.1. Les recherches sur l'enseignement de la chimie dans les années 1980-90..... | 25 |
| I.3.1.1. Le triangle de la chimie de Johnstone..... | 25 |
| I.3.1.2. La dualité macroscopique-microscopique selon Barlet et Plouin..... | 26 |
| I.3.1.3. Les recherches sur les modèles particuliers de la matière en France..... | 27 |
| I.3.2. Le schéma de la modélisation de Martinand..... | 27 |
| I.3.3. Adaptation à la chimie du schéma de la modélisation de Martinand par Laugier et Dumon..... | 30 |
| I.3.4. Les deux mondes de Tiberghien..... | 32 |
| I.3.5. Adaptation des deux mondes à la chimie : le monde reconstruit de Le Maréchal..... | 33 |
| I.3.6. Discussion..... | 39 |
| I.4. Approche tenant compte de la distinction entre transformation et réaction chimiques et entre modèles macroscopiques et « microscopiques »..... | 40 |
| I.4.1. Un schéma à trois niveaux..... | 40 |
| I.4.2. Description d'une situation expérimentale : le concept de transformation chimique..... | 41 |
| I.4.3. Modélisation des transformations chimiques totales..... | 43 |
| I.4.4. Entre catégorisation des connaissances et schéma d'actes de modélisation..... | 45 |
| I.5. Quelle place donner aux systèmes sémiotiques ?..... | 47 |
| I.5.1. Du triangle de la chimie au tétraèdre..... | 47 |

| | | |
|-----------------|---|-----------|
| I.5.2. | Le tétraèdre à l'origine d'un cadre d'analyse..... | 48 |
| I.5.3. | Le tétraèdre discuté..... | 49 |
| I.5.4. | Au-delà du tétraèdre | 50 |
| Chapitre II | Élèves confrontés aux modèles et représentations sémiotiques..... | 52 |
| II.1. | Raisonnements d'élèves à propos d'évolution de systèmes chimiques | 52 |
| II.1.1. | Signification de l'équation de réaction | 52 |
| II.1.1.1. | Proposer une équation de réaction avant de réaliser une transformation chimique | 53 |
| II.1.1.2. | Utiliser une équation de réaction pour appliquer le critère d'évolution.. | 54 |
| II.1.1.3. | Bilan..... | 56 |
| II.1.2. | Identifier une transformation chimique pour écrire une équation de réaction | 56 |
| II.1.2.1. | Une identification de la transformation chimique préalable à l'écriture de l'équation de réaction | 56 |
| II.1.2.2. | Des observations à l'écriture de l'équation de réaction sans mention de transformation chimique..... | 61 |
| II.1.2.3. | Conclusion | 62 |
| II.1.3. | Apport des observations de classe à la connaissance des raisonnements d'élèves sur l'évolution des systèmes chimiques | 63 |
| II.2. | Systèmes sémiotiques enseignés en chimie : des difficultés très spécifiques | 63 |
| II.2.1. | Appropriation du langage élémentaire de la chimie..... | 64 |
| II.2.2. | Les représentations sémiotiques en stéréochimie..... | 66 |
| II.3. | Le projet EVEILS : génération d'un espace virtuel et appréhension d'un monde inaccessible..... | 69 |
| II.3.1. | Les étapes du projet | 70 |
| II.3.2. | La dernière phase : usage de simulations vidéos | 71 |
| II.4. | Perspectives | 71 |
| II.4.1. | Étudier l'introduction des transformations chimiques | 72 |
| II.4.2. | Étudier la conceptualisation de la liaison chimique | 72 |
| Partie B | Recherches didactiques sur les pratiques enseignantes en chimie | 75 |
| I.1. | Étudier les pratiques enseignantes | 75 |
| I.2. | La double approche didactique et ergonomique | 77 |
| I.2.1. | La double approche s'inscrit dans la théorie de l'activité | 77 |
| I.2.2. | L'origine de la double approche..... | 78 |
| I.2.3. | Les composantes des pratiques..... | 78 |
| I.2.4. | Une méthodologie mixte..... | 79 |
| I.2.5. | Analyse des tâches | 80 |
| I.2.6. | Activité de l'enseignant ou pratiques enseignantes ?..... | 80 |
| I.3. | Activités d'enseignants de physique-chimie : une étape vers la caractérisation de leurs pratiques | 81 |
| I.3.1. | Caractérisation de l'activité de madame Branly..... | 82 |
| I.3.2. | Trois activités contrastées analysées sur le thème des piles électrochimiques.. | 83 |
| I.3.3. | Comparaison de deux séances sur le thème du critère d'évolution | 85 |
| I.3.3.1. | Les projets de séances..... | 85 |
| I.3.3.2. | Comparaison des déroulements..... | 86 |
| I.3.3.3. | Des logiques d'action contrastées | 87 |
| I.3.4. | Bilan de ces recherches..... | 87 |
| I.4. | Une incursion du côté des connaissances professionnelles des enseignants | 89 |
| I.4.1. | Connaissances, croyances, savoirs | 89 |
| I.4.2. | Une brève esquisse de l'évolution du concept PCK..... | 90 |
| I.4.2.1. | La catégorisation des connaissances professionnelles de Shulman | 91 |
| I.4.2.2. | Un modèle des PCK..... | 92 |
| I.4.2.3. | Les PCK, des connaissances ou autre chose? | 93 |

| | | |
|--------|--|------------|
| I.4.3. | Reconstituer et inférer des connaissances : une question méthodologique.... | 95 |
| I.4.4. | Double approche et connaissances professionnelles des enseignants | 95 |
| I.4.5. | Une étude de cas visant à examiner le lien entre PCK et PK..... | 97 |
| I.4.6. | Une étude de cas portant sur le développement des PCK lors de deux séances consécutives..... | 98 |
| I.4.7. | Bilan | 99 |
| I.5. | Perspectives | 100 |
| | Bibliographie..... | 102 |

RÉSUMÉ DES RECHERCHES

Mes recherches ont été effectuées principalement en didactique de la chimie selon deux grandes thématiques, l'étude des raisonnements d'élèves mettant en jeu des modèles ou une modélisation des situations expérimentales en chimie, et l'étude descriptive et compréhensive des pratiques enseignantes en chimie.

ANALYSE ÉPISTÉMOLOGIQUE ET DIDACTIQUE DU THÈME DES TRANSFORMATIONS CHIMIQUES DE LA MATIÈRE

La première thématique a trait aux modèles, terme souvent utilisé dans l'enseignement et ailleurs. Je présente une brève étude épistémologique rappelant les caractéristiques principales et les fonctions reconnues d'un modèle scientifique à savoir représenter, expliquer et prévoir, et les liens et différences entre les modèles, les théories et la réalité pour appuyer la réflexion épistémologique et didactique que j'ai menée à propos des modèles scientifiques scolaires concernant les transformations chimiques de la matière.

CLARIFICATION ÉPISTÉMOLOGIQUE ET DIDACTIQUE

Dans l'enseignement de la chimie, jusqu'à la mise en œuvre des programmes de lycée 2000-2002, seuls les modèles microscopiques de la matière étaient présentés comme tels. Les auteurs de ces programmes ont notamment effectué une création didactique (Chevallard, 1985) en considérant qu'une réaction chimique est un modèle macroscopique d'une transformation chimique totale. L'analyse épistémologique et didactique que j'ai faite à la suite de la diffusion de ce programme m'a conduite à proposer un schéma représentant les savoirs en jeu à propos des transformations chimiques de la matière et articulant le niveau théorique, le niveau des modèles et le niveau expérimental. Dans cette note de synthèse, je situe l'élaboration de ce schéma parmi les autres cadres de la modélisation utilisés dans des recherches sur l'enseignement des sciences et plus particulièrement de la physique et la chimie dans le secondaire. L'analyse de ces cadres montre une forme de filiation de ce schéma avec les cadres de Martinand (1998), Tiberghien (1999) et Le Maréchal (1999). Cependant sa spécificité consiste à, d'une part, permettre une distinction claire entre modèle microscopique et modèle macroscopique des transformations chimiques de la matière et à, d'autre part, proposer une catégorisation des concepts relevant du niveau expérimental en deux parties conduisant à structurer ce niveau selon la réalité perçue et la réalité idéalisée. La spécification de ce schéma au modèle macroscopique des transformations chimiques permet de mettre en valeur l'unicité de la réaction chimique (ou de la paire de réactions chimiques inverses dans le cas de transformations chimiques non totales) par rapport à la famille des transformations chimiques qu'elle modélise, tout en restituant le caractère éminemment construit d'une transformation chimique, bilan constitué dans une réalité idéalisée. Le fait qu'une même réaction chimique interprète ou prévoit toute une famille de transformations chimiques totales faisant intervenir qualitativement les mêmes espèces chimiques mais correspondant à des résultats expérimentaux différents peut constituer un levier pour amener les élèves à concevoir la différence de nature et de rôle des deux concepts. Le schéma proposé constitue une grille d'analyse des connaissances mises en œuvre par les élèves et permet de repérer les actes de modélisation.

ANALYSE DE RAISONNEMENTS D'ÉLÈVES EN CLASSE

Les observations de séances de travaux pratiques effectuées durant les deux dernières années d'application (2011 et 2012) du programme de lycée 2002, en classe de terminale, m'ont permis de mettre en évidence des exemples de raisonnements d'élèves aux prises avec des situations expérimentales à modéliser ou à prévoir. Leur interprétation selon l'approche épistémologique et didactique précédemment explicitée montre que l'équation de réaction reste une

représentation symbolique complexe dont les significations associées ne sont pas toutes mobilisées spontanément par les élèves et que le passage de la réalité perçue à la réalité idéalisée, des observations au constat d'une transformation chimique, nécessite d'aller au-delà des seules observations lorsqu'elles sont peu marquantes en utilisant le principe de conservation des éléments chimiques. Ce principe constitue le paradigme explicatif majeur en classe de chimie, sans qu'il soit toujours mentionné, ce qui conduit à dire que les interprétations ou les modélisations faites par les élèves s'effectuent sous contrôle, puisqu'ils le respectent en écrivant notamment des formules utilisant les symboles chimiques, indice de l'appartenance à un collectif de pensée (Sensevy & Santini, 2006).

UN REGARD DIDACTIQUE SUR L'ACTIVITÉ D'ENSEIGNANTS EN CHIMIE

La seconde thématique de mes recherches porte sur l'étude didactique des pratiques d'enseignants de chimie dans une visée descriptive et compréhensive à portée heuristique (Bru, 2002) selon deux orientations complémentaires : identifier les choix des enseignants pour repérer d'éventuelles régularités et des éléments de variation interindividuelle et intra-individuelle de leur activité en classe d'une part, inférer des connaissances professionnelles et notamment les PCK (pedagogical content knowledge, littéralement connaissances pédagogiques du contenu qui correspondent aux connaissances professionnelles didactiques (Sensevy & Amade-Escot, 2007)) à partir de l'analyse de l'activité en classe d'autre part.

APPROPRIATION D'UN CADRE D'ANALYSE DES PRATIQUES

Ces recherches sont faites selon le cadre théorique et méthodologique de la double approche didactique et ergonomique (Robert & Rogalski, 2002) importé de la didactique des mathématiques dont j'ai effectué l'adaptation à une autre discipline scolaire comportant un aspect expérimental. Ce cadre s'appuie sur la théorie de l'activité et vise à rendre compte de la complexité et de la cohérence des pratiques d'enseignants, considérés comme des professionnels exerçant un métier qui comporte des contraintes et des ressources (Robert & Rogalski, 2002). L'activité est considérée comme regroupant tout ce qu'un sujet entreprend pour réaliser une tâche, et à ce titre constitue un sous-ensemble des pratiques qui, schématiquement, englobent toutes les décisions, pensées et actes d'un enseignant dans et hors la classe en vue d'exercer son métier. Pour concevoir une séance l'enseignant choisit des tâches (type, ordre) pour les élèves (aspect cognitif), qu'il accompagne en général lors de la mise en œuvre d'aides, d'indications ou de modifications destinées à maintenir une ambiance de travail, faciliter l'accomplissement de la tâche et provoquer la conceptualisation. Ces aspects correspondent aux composantes cognitive et médiative des pratiques. Les choix de tâches et d'accompagnement sont influencés diversement par les programmes, les types d'élèves, les conditions de travail matérielles dans l'établissement, les habitudes professionnelles des enseignants de la discipline, les croyances et conceptions de l'enseignant. Ces déterminants des pratiques sont associés aux composantes institutionnelle, sociale et personnelle des pratiques. Les cinq composantes des pratiques sont combinées pour reconstituer les logiques d'action des enseignants et révéler la cohérence des pratiques. Utiliser le cadre de la double approche pour étudier les connaissances professionnelles d'un enseignant et notamment ses PCK qui sont un facteur rattaché à la composante personnelle des pratiques, constitue une nouveauté dans le champ des recherches didactiques sur les pratiques enseignantes.

L'utilisation du cadre de la double approche hors du champ dans lequel il a été élaboré, a nécessité quelques adaptations : l'introduction d'un nouveau facteur associé à la composante sociale des pratiques (les relations entre les préparateurs de chimie et les enseignants), et la modification du facteur « ressources » attaché à la composante institutionnelle (avec

l'adjonction du matériel et des produits chimiques). Les analyses conduites ont montré l'influence de ces deux facteurs sur l'activité des enseignants observés.

CARACTÉRISATION DE L'ACTIVITÉ D'ENSEIGNANTS EN CLASSE DE CHIMIE

L'analyse des observations de séances de classe (en terminale, où le programme constitue un déterminant institutionnel central) effectuées pour quatre enseignants et à propos de deux thèmes différents a permis de caractériser leur activité. L'activité d'un enseignant est complexe (elle relève de déterminants différents), cohérente (elle peut s'expliquer) et peut être décrite par une imbrication des composantes des pratiques. Ce résultat rejoint ceux obtenus lors d'études des pratiques d'enseignants de mathématiques et plaide pour l'intérêt de l'export de ce cadre à une autre didactique. La comparaison de l'activité de trois enseignantes lors d'une séance sur les piles électrochimiques montre que les choix effectués sont le fruit d'une interaction entre des facteurs appartenant à différentes composantes des pratiques. Cette interaction peut consister en une prépondérance d'une composante des pratiques sur les autres, une tension entre composantes aboutissant à des compromis voire des renoncements, une imbrication des composantes qui marque un renforcement du choix. L'analyse de l'activité d'un enseignant débutant, sur le thème de l'introduction du critère d'évolution, comparée à celle d'une enseignante expérimentée, met en évidence une tension entre la composante institutionnelle et la composante personnelle de ses pratiques aboutissant à un renoncement. Au contraire de sa collègue il ne conduit pas de stratégie laissant place à l'expression des idées des élèves pourtant recommandée par le programme. Les logiques d'action mises au jour sont bien contrastées et signalent l'accent sur lequel portent les actes des enseignants tout en dévoilant les marges de manœuvre investies par les enseignantes expérimentées observées.

LES PCK, UN FACTEUR DE LA COMPOSANTE PERSONNELLE DES PRATIQUES

Au plan international, les études sur les pratiques enseignantes qui cherchent à identifier et décrire les PCK des enseignants sur différents contenus disciplinaires sont nombreuses. Cependant aucune ne s'appuie véritablement sur un cadre théorique référant à l'action ou à l'activité, contrairement à certaines recherches menées en France (voir Grangeat, 2015b par exemple). Inférer des connaissances professionnelles didactiques à partir d'une analyse de l'action dans le cadre de la double approche didactique et ergonomique revient à particulariser l'étude d'un facteur associé à la composante personnelle des pratiques. Les deux études de cas que j'ai menées permettent de proposer des facteurs favorisant le développement des PCK : une stratégie pédagogique permettant l'expression des raisonnements des élèves, l'identification de raisonnements erronés ou inattendus d'élèves (nécessitant une bonne maîtrise du contenu disciplinaire), la volonté de l'enseignant de démêler les raisonnements d'élèves. Ce développement dépend également de la capacité réflexive de l'enseignant et de son expérience d'enseignement sur le contenu en jeu. Enfin, il apparaît que connaître une stratégie pédagogique ne suffit pas pour la mettre en œuvre, il faut aussi que l'enseignant s'en sente capable afin d'agir en ce sens. Modifier la perception qu'a un enseignant de sa capacité à agir est une question à résoudre.

PERSPECTIVES DE RECHERCHE

Je propose différents projets de recherche pour caractériser les raisonnements et difficultés des élèves. Le premier, dans la continuité des recherches déjà menées veut étudier l'introduction des transformations chimiques. Le schéma distinguant les niveaux de savoirs relevant de la réalité perçue, de la réalité idéalisée et des modèles peut être utilisé comme guide pour élaborer une séquence d'enseignement visant à faire travailler la distinction entre les concepts de transformation chimique et réaction. Le second souhaite explorer la conceptualisation de la

Résumé

liaison chimique d'élèves en classe de première selon deux entrées illustrant la dualité macroscopique-microscopique : la matière colorée et la dissolution de solides. J'expose dans la note de synthèse les nombreuses raisons de ce choix. Ces projets sont à compléter par un « volet enseignants », il s'agirait d'observer et analyser les pratiques d'enseignement de ces contenus pour poursuivre l'inventaire des pratiques d'enseignants du second degré en chimie et aborder un nouveau champ inexploré en France, les PCK des enseignants sur la liaison chimique. Enfin un autre projet consisterait à étudier comment le concept de liaison chimique est invoqué, utilisé dans l'enseignement supérieur dans les cours introductifs à destination d'étudiants engagés dans un cursus de chimie ou non, pour poursuivre l'étude des pratiques d'enseignants de chimie dans le supérieur.

EXPOSÉ SYNTHÉTIQUE DES RECHERCHES

Modèles et modélisation dans l'enseignement de la chimie : d'une analyse épistémologique et didactique à l'étude des pratiques enseignantes

Introduction

Une partie importante de mes recherches porte sur l'enseignement et l'apprentissage de la chimie, plus précisément sur les phénomènes accompagnant ces processus qui concernent deux types d'acteurs, les enseignants et les élèves ou étudiants, ayant un rapport dissymétrique au savoir en jeu, au sein d'institutions spécialisées dans l'éducation et la formation. Cet objet d'étude est celui de la didactique de la chimie, discipline de recherche (Reuter, 2007), qui, pour reprendre les termes de Christian Orange (2014), a pour programme de « *lever les ambiguïtés sur ce qui s'enseigne, sur ce qui peut s'enseigner et sur ce qui peut s'apprendre* » (p.90).

La chimie est une discipline scolaire (Reuter, 2007) qui dans le système secondaire français est enseignée avec la physique par le professeur de physique-chimie, dont la formation et l'intérêt pour la discipline (intérêt disciplinaire) ne coïncident pas toujours avec l'intérêt pour l'enseignement de la discipline (intérêt didactique) (Alturkmani, 2015). Bien qu'ayant suivi un cursus d'études complètement bi-disciplinaires de physique et de chimie jusqu'à la maîtrise et la préparation au CAPES, j'ai cependant éprouvé un intérêt plus grand pour la chimie qui m'a conduit à passer l'agrégation de chimie et non celle de physique. J'ai enseigné la physique et la chimie en lycée pendant onze années avant de me tourner vers l'enseignement de la chimie à l'université où les deux disciplines sont bien disjointes et où apparaît de plus, une distinction forte entre enseignement de la chimie générale (qu'on peut subdiviser en chimie physique, chimie inorganique, électrochimie...) et enseignement de la chimie organique. Intégrer une équipe de recherche formée de didacticiens de la physique¹ est naturel, eu égard à la proximité de l'enseignement de ces deux disciplines dans le secondaire. Collaborer à des projets de recherche en didactique de la physique (il s'agit de ma participation à l'ANR EVEILS que j'évoquerai) est alors une conséquence naturelle de l'appartenance à une équipe de recherche pluridisciplinaire. Collaborer à des projets de recherche portant sur un thème transdisciplinaire (qu'on retrouve dans plusieurs disciplines, le thème des exemples et des cas dont je reparlerai) constitue une autre conséquence de cette appartenance. Affirmer et caractériser la spécificité de la didactique de la chimie parmi les didactiques des autres disciplines au sein de cette équipe constitue également un défi stimulant. Cela passe aussi par la délimitation de l'objet d'étude de la chimie elle-même dont Bensaude-Vincent (2005) dit qu'elle est engagée dans « *un duel toujours recommencé* » avec la physique et qu'elle s'en distingue dans l'étude de la matière par la recherche des grands principes qui régissent ses transformations alors que les physiciens sont « *en quête des constituants ultimes de la matière* » (p.166).

La chimie en tant que science peut se définir par son objet d'étude et ses méthodes. L'objet d'étude de la chimie est la matière (inanimée, sinon on parle de biochimie) qu'il s'agit de transformer, de synthétiser (fabriquer des composés qu'on trouve dans la nature ou pas) ou d'inventer (recherche de médicaments, de matériaux nouveaux aux propriétés définies,...). « *La chimie est une science qui va du fictif au factice* » résume la pensée de Bachelard selon Bensaude-Vincent (2005, p.120). Les substances sont d'abord inventées, fictives, à l'aide des « *outils de papier* » que constituent les formules moléculaires (Klein, 2001), puis fabriquées en mettant « *les molécules au travail* » (Bensaude-Vincent, 2005, p.129). La chimie désigne aussi une industrie puissante à l'image assez négative (Chastrette & Dumon, 2007) dont les méthodes ne sont guère différentes de celle de la science, si on excepte les adaptations engendrées par le changement d'échelle du laboratoire à l'usine, et dont l'objet est aussi les transformations intentionnelles de la matière.

¹ Cette équipe, le LDAR, est constituée aussi de didacticiens des mathématiques (dès 2009, année de mon entrée dans l'équipe en tant qu'enseignante-chercheure), de didacticiens des sciences de la vie et de la terre (depuis deux ans) et d'une didacticienne de la géographie (depuis un an).

Mes recherches dans le champ de la didactique de la chimie concernent l'étude des raisonnements d'élèves et d'étudiants mettant en jeu des modèles ou une modélisation des situations expérimentales, et l'étude descriptive et compréhensive des pratiques enseignantes.

Ma thèse a porté sur l'appropriation par les élèves et les enseignants de l'approche renouvelée de l'évolution des systèmes chimiques dans le programme de chimie en classe de terminale S (mis en place en 2002 et en vigueur jusqu'en septembre 2012). J'ai effectué une analyse épistémologique de ce thème montrant la rupture opérée avec le précédent programme et la présence de trois modèles sous-jacents aux notions abordées. J'ai mis en évidence que l'utilisation des modèles était inégale, l'utilisation du modèle thermodynamique (comparaison du quotient de réaction du système pour l'état considéré à la constante d'équilibre) faisant l'objet d'une procédure algorithmique simple était privilégiée par les élèves et les enseignants alors que les deux modèles cinétiques ont été délaissés, voire non enseignés (Kermen & Méheut, 2008). Certaines erreurs commises par les élèves dans l'utilisation du critère d'évolution relèvent d'une difficulté à distinguer la situation expérimentale de son interprétation par le modèle (Kermen & Méheut, 2011). La nécessaire distinction entre les faits et les modèles voulue par les auteurs de programme et à l'origine d'une création didactique, le concept de réaction chimique modèle d'une famille² de transformations chimiques, n'a pas été perçue dans toute sa dimension par les enseignants (Kermen & Méheut, 2008) ni par les élèves (Kermen & Méheut, 2009). Les analyses ont aussi montré une absence de distinction nette entre ce qui relève du domaine macroscopique et du domaine microscopique en matière de modèle cinétique, par les élèves (Kermen & Méheut, 2009), certains enseignants (Kermen & Méheut, 2008) et auteurs de manuels scolaires (Négrier & Kermen, 2011). L'analyse des manuels scolaires a été menée postérieurement à la thèse et en collaboration avec Matthieu Négrier. Elle a montré d'une part que l'appropriation par un tiers (Matthieu Négrier) du cadre d'analyse de ce savoir que j'avais construit à partir du programme et de réflexions épistémologiques était possible, et d'autre part que les manuels présentaient des formulations et présentations discutables susceptibles d'éclairer certaines des difficultés constatées chez les élèves et les enseignants.

La première partie de cette note de synthèse est consacrée à une réflexion épistémologique et didactique sur le savoir à enseigner en chimie, plus particulièrement dans le cadre des transformations chimiques de la matière. Cette réflexion s'articule autour d'une caractérisation des modèles scientifiques, d'une analyse des cadres de la modélisation dans l'enseignement secondaire en France, sur la prise en compte des modèles dans les programmes du secondaire et dans l'enseignement de la chimie à ce niveau. Je présente ensuite quelques extraits des études que j'ai conduites ou dirigées après ma thèse, portant sur la compréhension des raisonnements des élèves et les mets en perspective à la lumière de la réflexion précédente. Je propose une première série de perspectives de recherche sur les raisonnements d'élèves pour poursuivre la réflexion amorcée.

La deuxième partie présente mes recherches didactiques sur les pratiques enseignantes. Dans ma thèse, l'étude de pratiques déclarées d'enseignants m'avait permis d'aborder ce champ de façon exploratoire en sondant leur connaissance du contenu disciplinaire et leur connaissance du programme (et des intentions didactiques des auteurs) notamment par le biais de la présentation d'erreurs d'élèves. Depuis j'ai abordé le champ des recherches sur les pratiques effectives des enseignants du secondaire que je présente en deux volets. Je développe l'adaptation d'un cadre d'étude des pratiques importé de la didactique des mathématiques auquel j'ajoute une catégorisation des connaissances professionnelles, puis les résultats des études menées visant à décrire et comparer l'activité de plusieurs enseignants sur un même

² Je reviendrai sur ce terme qui m'est propre (Kermen, 2015b) et ne provient pas des auteurs du programme.

Introduction

thème afin d'identifier des régularités et des variabilités, et visant à inférer certaines connaissances professionnelles didactiques et à proposer des facteurs de leurs conditions de développement.

Je termine par des perspectives de recherche, dans lesquelles j'évoque brièvement une orientation pour l'instant moins développée de mes recherches sur les pratiques, celle portant sur les enseignants du supérieur.

Partie A Approche épistémologique et didactique

Chapitre I Réflexions épistémologiques et didactiques autour des transformations chimiques de la matière

Au moment de ma thèse, bien que j'aie parlé de rupture avec le programme antérieur à propos de l'usage de modèles macroscopiques en chimie (Kermen, 2007), je n'ai pas mesuré l'ampleur de la rupture opérée ni la lenteur de la diffusion de ce changement. En effet, à partir de 2010 (soit 8 ans après la mise en place de ce programme), lors de formations que j'ai animées, ou de l'observation d'enseignants dans leur classe³, j'ai fait le constat d'un certain étonnement des enseignants devant la mention de modèles macroscopiques et face à la présentation de la différence de nature entre les concepts de transformation chimique et réaction chimique. Cela et la propension de certains didacticiens à ne parler de modèles qu'à l'échelle atomico-moléculaire m'ont conduit à renforcer ma réflexion épistémologique et didactique.

J'effectue pour cela une brève présentation de l'état des réflexions sur les programmes et l'enseignement de la chimie dans les années 1980-90, puis je rappelle quelques fondements épistémologiques de la notion de modèle en sciences et dans l'enseignement des sciences. Je me livre ensuite à une présentation relativement détaillée des différentes approches de la modélisation rencontrées dans les recherches en didactique des sciences et de la chimie afin de les comparer et de préciser la part qu'elles ont eue dans mon approche (réflexion que je n'ai pas exposée dans ma thèse), que je détaille ensuite pour indiquer l'évolution qu'elle a connue depuis mon travail de thèse.

I.1. Place des modèles dans l'enseignement de la chimie

Cette partie replace l'élaboration des programmes de lycée dans le contexte de l'époque. Les auteurs du programme de chimie 2002 ont cherché à communiquer leurs intentions par le biais d'articles les explicitant dans le bulletin de l'union des physiciens (Davous et al., 2002) et dans

³ Voire même à l'occasion des cours que j'ai donnés au master recherche de l'université Paris Diderot à des enseignants en exercice.

l'actualité chimique (Davous et al., 2003). Ils se sont clairement placés dans la même lignée que les auteurs des programmes précédents qui, pour la première fois, étaient le fruit d'une réflexion collective incluant des didacticiens et des enseignants de terrain (dans les groupes techniques disciplinaires GTD).

I.1.1. Le contexte antérieur aux programmes de lycée 2000-2002

Pendant très longtemps dans les programmes de chimie français, il n'a été question de modèle que pour le « modèle de l'atome » ou un modèle particulière. Cela a peut-être favorisé une vision très restrictive de la nature des modèles qui ne concerneraient que des entités hypothétiques⁴ ou inaccessibles à la perception ordinaire.

À propos des programmes de 1992, élaborés par des groupes techniques disciplinaires (GTD), Jacques Toussaint (1995) écrit que deux grands principes ont présidé à leur élaboration, la présentation par thèmes conducteurs annuels qui constitue une « *transposition radicale du savoir et des pratiques de référence du chimiste et du physicien* » et « *une plus grande démocratisation de la culture scientifique et technique* » (p.313) qui doit se traduire par un enseignement qui ne soit pas réservé aux seuls élèves se destinant à des carrières scientifiques en physique ou en chimie. Il y voit une volonté de « *replacer la physique et la chimie comme sciences de modèles* » (p.314). Dans un article paru dans *Didaskalia*, Monique Goffard (1994) qui était membre du GTD chimie, justifie certains des choix faits par les auteurs du programme : ancrer la chimie dans la vie quotidienne en proposant une étude par thèmes, présenter les thèmes abordés sous forme de questions pour favoriser une approche type résolution de problème. Elle révèle qu'une première formulation des programmes qui proposait de faire « *concevoir et réaliser* » des protocoles expérimentaux aux élèves « *en respectant les consignes de sécurité* » a été réduite à « *réaliser* » lors d'arbitrages administratifs (Goffard, 1994).

À propos des modèles, Monique Goffard s'interroge sur la place à leur accorder dans l'enseignement de la chimie pour souligner la nécessité de ne pas toujours les présenter « *comme une construction a priori* » afin d'initier les élèves à des démarches de modélisation, le modèle constituant alors une conclusion apportée lors de la phase de structuration. Il s'agit aussi de « *distinguer entre faits d'observation et interprétation, entre description phénoménologique et description modélisante* » (Goffard, 1994, p.132). Cependant dans cet article le mot modèle n'est utilisé que pour parler de l'atome, tout comme dans les programmes. Il n'est donc question que de modèles microscopiques⁵ ou particuliers de la matière.

Un changement de point de vue survient avec les programmes de lycée entrant en vigueur à la rentrée 2000.

I.1.2. Le programme de chimie 2000-2002 du lycée

Après une brève présentation des intentions didactiques communiquées par les auteurs du programme de lycée 2000-2002, j'aborde les contenus ayant fait l'objet de modifications

⁴ Morge (2007) a montré que le changement de statut des atomes et molécules dans les programmes de collège 2008 où l'existence de ces particules est affirmée alors que précédemment « *leur caractère construit en insistant sur la notion de modèle* »(p.23) était mis en avant, n'empêche pas de les modéliser.

⁵ Pour me conformer aux usages je parlerai de modèle microscopique alors que si l'on devait tenir compte de la taille des entités convoquées, il serait plus juste de parler de modèle nanoscopique ou encore submicroscopique comme le font les auteurs anglo-saxons.

majeures dans ces programmes par rapport aux précédents et sur lesquels mes recherches ont ensuite porté.

I.1.2.1. Les intentions des auteurs du programme

Dans l'Actualité Chimique, les auteurs du programme de lycée entré en vigueur en 2000 en classe de seconde énoncent leurs intentions globales pour les trois années de lycée sous la forme de quatre « *points marquants du programme* » :

1. la mise en place d'un outil d'analyse quantitative et d'une démarche pédagogique pour établir des bilans de matière : l'avancement et le tableau descriptif de l'évolution des systèmes ;
2. une approche de l'évolution des systèmes chimiques vers l'équilibre (quotient de réaction), qui ne donne pas des idées fausses et qui n'hypothèque pas l'avenir (GEPS/CNP, BUP, 2002) ;
3. une entrée sur la chimie organique (la chimie créatrice), qui ne soit pas basée sur les monographies ;
4. des activités qui développent chez les élèves un double regard macroscopique et microscopique. (Davous et al., 2003)

Les auteurs du programme renouvellent l'approche du concept de réaction chimique (qui sous-tend le point 1). Ils placent cette approche dans le même état d'esprit que les auteurs du programme précédent : « *la pratique expérimentale dans l'enseignement ne favorise la formation de l'esprit scientifique que si elle est accompagnée d'une pratique du questionnement et de la modélisation* » (Ministère, 1999). Ils effectuent une véritable création didactique (Chevallard, 1985) en attribuant deux significations différentes aux termes transformation chimique et réaction chimique qui recouvrent alors deux concepts différents (Ministère, 1999). Dans l'introduction du programme de seconde, ils écrivent que « *le concept de la "réaction chimique" comme modèle de la transformation chimique d'un système repose sur une analyse* » dans laquelle la modélisation est considérée comme un « *travail d'élaboration d'une représentation abstraite simplifiée d'un phénomène* » (Ministère, 1999, p.8). Puis ils précisent « *l'enseignant fait bien la distinction entre la transformation subie par le système et la réaction chimique qui modélise cette transformation* » (Ministère, 1999, p.15). Ce renouvellement est un préalable à un autre changement l'introduction du critère d'évolution (point 2) pour aborder l'évolution vers l'équilibre chimique qui est envisagé d'un double point de vue macroscopique et microscopique (point 4). Mes travaux de thèse se sont particulièrement intéressés aux points 2 et 4.

I.1.2.2. Les contenus chimiques objets de changements majeurs

Pour la classe de seconde (rentrée 2000), les auteurs du programme proposent une représentation schématique d'une transformation chimique (Figure 1) mettant en exergue l'état initial et l'état final du système chimique étudié (BO 1999, p.16⁶ ; Davous et al., 1999, p. 11).

⁶ Bulletin Officiel Hors Série n°6, 12 août 1999

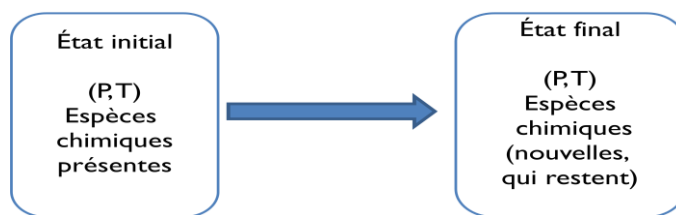


Figure 1 : Schématisation d'une transformation chimique

Le système chimique étant une partie du monde macroscopique, dès lors qu'un des paramètres décrivant le système varie, le système est le siège d'une « transformation » un concept macroscopique issu de la thermodynamique. La description de l'état initial et de l'état final du système est indispensable pour qualifier la transformation observée. Elle est dite chimique si la nature des substances qui constituent le système change. La réaction chimique qui modélise une transformation chimique totale (totale signifie qu'il y a disparition d'au moins une des espèces chimiques présentes initialement) est donc un modèle macroscopique. Dans l'histoire des sciences, le concept de réaction chimique au sens de substances interagissant dans des proportions données pour fournir d'autres substances en quantités données (masses ou volumes à l'époque) a d'abord fait l'objet d'une conceptualisation macroscopique. La première symbolisation d'une réaction chimique est due à Lavoisier, « *moût de raisin=acide carbonique+alcool* » (Dehon & Snauwaert, 2015a ; Mzoughi-Khadhraoui & Dumon, 2012). Cette équation littérale formalise la conservation de la masse et celle des « principes » constitutifs des espèces chimiques (Dehon & Snauwaert, 2015a ; Mzoughi-Khadhraoui & Dumon, 2012), on dirait aujourd'hui les éléments chimiques. La réaction chimique considérée comme un modèle macroscopique constitue finalement un retour aux sources historiques.

Dans le programme qui entre en application en 2002 en classe de terminale S, le champ expérimental des transformations chimiques étudiées s'élargit à celui des transformations non totales. Dans l'état final du système, les réactifs (les espèces dont la quantité a diminué au cours de l'évolution du système) sont encore présents, l'état est appelé état d'équilibre chimique.

Ces transformations remettent en cause les connaissances construites par les élèves jusqu'ici (collège, seconde, première). Il s'agit de concevoir que des transformations chimiques puissent ne pas être totales et qu'elles soient possibles dans le sens inverse du sens « habituel » de l'équation chimique (Van Driel, De Vos, Verloop, & Dekkers, 1998).

Une transformation chimique est alors interprétée par une paire de réactions chimiques inverses, par exemple $AH_{(aq)} + H_2O_{(l)} \rightarrow A^{-}_{(aq)} + H_3O^{+}_{(aq)}$ et $A^{-}_{(aq)} + H_3O^{+}_{(aq)} \rightarrow AH_{(aq)} + H_2O_{(l)}$ symbolisée par une seule équation chimique telle que $AH_{(aq)} + H_2O_{(l)} = A^{-}_{(aq)} + H_3O^{+}_{(aq)}$, à laquelle est associée une grandeur ne dépendant que de la température, la constante d'équilibre K . Les auteurs du programme introduisent un critère qui permet de prévoir et d'expliquer le sens d'évolution d'un système chimique en référence à une équation de réaction donnée. Ce critère consiste en la comparaison d'une grandeur le quotient de réaction, défini à partir de l'écriture de l'équation de réaction, et dont la comparaison de la valeur dans l'état considéré, à la constante d'équilibre associée à l'équation de réaction permet de justifier ou prévoir le sens d'évolution du système.

Ce critère d'évolution est une nouveauté qui permet aussi d'aborder des situations expérimentales comportant initialement toutes les espèces chimiques intervenant dans une transformation chimique, à savoir les (futurs) réactifs et les (futurs) produits. Cet aspect ne concerne que le regard macroscopique sur les phénomènes étudiés, pour développer un regard microscopique, un modèle cinétique est proposé.

Avant d'analyser plus avant les modèles proposés dans ce programme, il me paraît nécessaire de rappeler ce qui caractérise les modèles scientifiques dans l'enseignement des sciences et plus précisément l'enseignement de la physique et de la chimie.

I.2. Qu'entend-on par modèle dans l'enseignement des sciences ?

Dans cette partie, je souhaite rappeler les principaux repères épistémologiques sur les modèles en sciences en me fondant sur des écrits de philosophes des sciences ou de didacticiens commentant des écrits d'épistémologues, pour introduire les aspects qui me paraissent avoir une importance ensuite. Je souhaite en particulier dégager les caractéristiques des modèles qui permettent de montrer que la chimie utilise aussi des modèles macroscopiques, puisqu'on l'a vu certains auteurs semblent restreindre l'usage des modèles en chimie au niveau microscopique.

I.2.1. Regard épistémologique

La polysémie du terme modèle est reconnue (Adúriz-Bravo, 2013; Chamizo, 2013; Johsua & Dupin, 1993 ; Varenne, 2013) ce qui ne facilite pas la formulation d'une définition consensuelle de ce qu'est un modèle scientifique. Soler (2013) s'accorde avec Drouin (1988) pour dire qu'il est illusoire de vouloir fournir une définition unique, qui ne pourrait satisfaire les diverses conceptions d'un modèle scientifique. Sensevy et Santini (2006) considèrent que selon l'idée que l'on a de la science et de l'activité scientifique, la conception de ce qu'est un modèle diffère. La plupart des auteurs qui s'interrogent sur ce que sont les modèles et sur leurs rôles, les mettent en regard avec les théories et la réalité.

I.2.1.1. Définir un modèle

Varenne (2013) arguant de la polysémie du terme considère qu'il est plus prudent de donner des caractéristiques qui permettent de reconnaître qu'on utilise un modèle, plutôt qu'une définition. Il propose une caractérisation empruntée à Marvin Minsky, chercheur en intelligence artificielle, « choisie pour sa simplicité et sa date récente » (1965) : « Pour un observateur B, un objet A* est un modèle d'un objet A dans la mesure où B peut utiliser A* pour répondre à des questions qui l'intéressent au sujet de A » (Varenne, 2013, p. 134). Cette caractérisation met l'accent sur l'observateur pour qui le modèle et l'objet (au sens large, il peut être abstrait) sont différents et sur un rôle du modèle, permettre de répondre aux questions que se pose l'observateur. Il s'agit d'un rôle dynamique. Cette caractérisation autorise qu'on fasse un modèle d'un autre modèle, pour aboutir à des modèles emboîtés. Dans la même lignée, pour Soler (2013) « un modèle est une construction intellectuelle à propos de quelque chose » qui permet de « résoudre des problèmes particuliers ».

Cependant, Varenne reconnaît que les épistémologues privilégient les modèles comme représentations directes d'un domaine réel localisé (2013, p.245). Les modèles sont alors des structures matérielles ou formelles d'un domaine circonscrit de la réalité pour représenter de façon simplifiée que ce soit de manière causale ou non cette réalité ou produire un résumé sur cette réalité (ce qui correspond au premier sens du terme modèle selon Barberousse, Kistler et Ludwig (2000), voir I.2.1.3), ou encore qui interprètent une théorie (deuxième sens pour Barberousse et al., 2000).

Dans le but d'unifier l'utilisation des modèles qui est faite dans l'enseignement de la chimie, Chamizo définit un modèle de la façon suivante « Models (m) are representations, usually based on analogies, which are built contextualizing certain portion of the world (M), with a specific goal » (Chamizo, 2013, p. 1618). Cette définition focalise sur une fonction des modèles, la représentation et accorde une place prépondérante à l'analogie dans la production des modèles comme d'autres avant lui, ainsi que l'illustre la citation suivante.

Chemists model both the phenomena they observe and the ideas with which they try to explain such phenomena - that is, at both the macroscopic and the sub-microscopic levels (Johnstone, 1993)- by the use of analogy with what they already know. (Justi & Gilbert, 2002a, p. 47)

Cette citation précise effectivement que les chimistes modélisent les phénomènes qu'ils observent, aux deux échelles macroscopique et microscopique ce qui tranche avec le point de vue habituel où l'emphase est mise sur les modèles microscopiques (par exemple Johnstone, 1993 ; Österlund, Berg, & Ekborg, 2010; Treagust, Chittleborough, & Mamiala, 2002), mais aussi les idées, ce qui paraît moins répandu. Cet ajout vise vraisemblablement à rendre compte d'une des spécificités de la chimie, le recours au monde submicroscopique. Du fait que les entités du monde submicroscopique sont inaccessibles à la perception commune, elles sont d'abord évoquées en tant qu'idées qu'il s'agit alors de modéliser. Ils complètent ce point de vue avec une définition d'un modèle qui mêle des considérations de différentes natures évoquant la formation au plan psychologique, l'expression selon différents modes de représentation⁷, l'utilisation, le champ d'application d'un modèle, la diffusion dans une communauté scientifique et finalement sa durée de validité.

A model:

is a mental image produced for a purpose;

is shared with other people as an expressed model through the use of a range of modes of representation (material, visual, verbal, mathematical);

is constructed from entities that may be derived from specific objects, or from concepts formed by abstraction across a range of similar objects;

may be constructed for a system, an event, or a process;

is used to explain the behaviour of a phenomenon following the making and testing of predictions based on the model;

is accepted as scientific knowledge, in an expressed form, once it has been approved by referees and published in a scientific journal;

can be modified or superseded after problems with its explanatory adequacy emerge;

is often one of an historical sequence within an area of enquiry. (Justi & Gilbert, 2002b, p.216)

Pour d'autres auteurs la notion de concept est centrale. « *Un modèle est composé de concepts* » (Robardet & Guillaud, 1997, p. 109). Il est constitué d'un « *corpus de concepts liés entre eux par un système de relations, le plus souvent de caractère fonctionnel, les concepts (...) n'existant qu'en référence à d'autres concepts* » (Johsua, 1994, p. 10-11).

1.2.1.2. Réalité et réalisme scientifique

Le réel ou la réalité, concerne des phénomènes qui existent indépendamment de l'esprit d'un observateur, et donc du mode d'élaboration de leurs représentations ou de leurs interprétations (Varenne, 2013, p.13), ce que Soler (2013) nomme la réalité métaphysique, objet de la quête éternelle de la recherche scientifique. Cette position réaliste s'oppose à l'idéalisme selon lequel la connaissance des objets du monde extérieur n'est qu'une affaire de perception (Tiercelin, 1999). Le réalisme scientifique s'oppose à l'instrumentalisme selon lequel les théories scientifiques ne sont que des moyens pour prévoir les observations (Tiercelin, 1999).

⁷ Ces différents modes ne sont pas exclusifs de mon point de vue, une équation mathématique est vue et peut être dite, un « modèle moléculaire » qui est une représentation matérielle d'une molécule est vu, peut être manipulé et décrit verbalement. Ils gagneraient à être précisés. Je les cite pour mémoire étant donné leur grande diffusion.

L'explication des phénomènes peut inclure des entités non physiques, des idées, et pour certains philosophes comme Cartwright et Hacking les entités théoriques que posent les théories et les lois sont réelles (Varenne, 2103, p.21). Hacking (1989) écrit qu'il a été convaincu de l'existence d'entités théoriques parce que « *des émetteurs conçus pour projeter des positrons et des électrons font exactement ce qui leur est demandé* » (p.53). La vérification expérimentale de prédictions de phénomènes (auparavant inconnus) à l'aide d'entités théoriques constitue l'argument le plus convaincant de la pertinence d'une position réaliste (Barberousse et al., 2000). Tiercelin (1999) comme Soler (2000) indique que l'antiréalisme présente aussi des arguments dignes de considération. Au final ceux que les discussions philosophiques toujours en cours laissent perplexes quand à l'attitude à adopter peuvent choisir une troisième voie, celle d'un réalisme minimal partagé par la grande majorité des scientifiques dans leur pratique (Tiercelin, 1999), qui considèrent notamment que « *les théories bien confirmées devraient être acceptées comme vraies* » (Tiercelin, 1999) ou « *approximativement vraies* » (Soler, 2013).

Bensaude-Vincent (2005), s'appuyant sur Hacking, écrit que les chimistes font preuve d'un « *réalisme opératoire* », puisqu'ils sont réalistes à propos des populations d'entités matérielles qu'ils mettent au travail dans des dispositifs expérimentaux, et dont ils se servent comme outils pour parvenir à leurs fins. Elle souligne que ce réalisme est plus complexe que le réalisme à propos des entités dépeint par Hacking parce que les chimistes considèrent que les entités matérielles qu'ils utilisent ont une capacité à agir, ce qui se rapproche du réalisme défendu par Cartwright (Bensaude-Vincent, 2005, p. 225).

I.2.1.3. Théorie et modèle

Johsua et Dupin (1993) considèrent qu'une théorie peut être vue comme une « *famille de modèles* », liés « *par des relations logiques et expérimentales qui assurent une certaine cohérence à l'ensemble* » (p.17). Les débats sont encore vifs sur ce que d'aucuns nomment une théorie, puisqu'Adúriz-Bravo (2013) replace ce point de vue fondé sur les modèles parmi ceux d'une vision sémantique des théories scientifiques. Le point de vue sémantique met en avant la fonction de communication des sciences, à savoir donner du sens au monde et permettre la compréhension des phénomènes, plutôt que la structure logique des théories (Adúriz-Bravo & Izquierdo-Aymerich, 2005).

Une façon de distinguer théories et modèles consiste à regarder leur étendue ou domaine d'application. Les théories correspondent à un ensemble de savoirs structurés relatifs à un champ empirique vaste (Bachelard, 1979 ; Johsua & Dupin, 1993) tandis que les modèles concernent des savoirs utilisés dans un champ plus restreint (Bachelard, 1979 ; Robardet & Guillaud, 1997), ils sont contextualisés (Sensevy & Santini, 2006). Un modèle peut alors être considéré comme étant un médiateur (intermédiaire entre) agissant entre la théorie (ou les théories auxquelles il réfère) qu'il interprète et la partie de la réalité qu'il formalise (Fernández-González, 2013; Sinaceur, 1999 ; Walliser, 1977). « *Un modèle réalise une articulation entre le concret de l'expérience et l'abstrait de la théorie en étant l'expression d'un collectif de pensée* » (Sensevy & Santini, 2006).

Barberousse et ses co-auteurs (2000) précisent qu'en philosophie des sciences le terme modèle a deux significations courantes peu en rapport l'une avec l'autre. Le premier sens recouvre une « *représentation provisoire, en accord imparfait avec les théories, et élaborée dans un but prospectif ou pour faire des calculs que les théories ne permettent pas* » (p.288), qu'on peut concevoir comme une formalisation de la réalité. Le second qui relève d'une interprétation sémantique des théories physiques, stipule qu'un modèle d'une théorie regroupe « *toutes les interprétations qui rendent vraies les formules de la théorie* » (p.290). Ils soulignent que, quel que soit le sens du terme modèle, le principal problème qui se pose concerne la relation que le modèle entretient avec les situations réelles qu'il représente (p.290).

1.2.1.4. Quelle relation entre modèle et réalité ?

Soler (2013) affirme qu'un modèle est infidèle à la réalité, au moins pour certains aspects qui peuvent être précisés, au contraire d'une théorie qui doit être fidèle à la réalité, puisque une théorie est « *approximativement vraie* » dans l'acception réaliste. Dans le cadre de la conception sémantique des théories physiques, Barberousse et ses co-auteurs (2000) indiquent qu'il y a à la fois une relation de ressemblance pour certaines propriétés pertinentes entre le modèle et la réalité et une relation d'abstraction fondée sur la négation de certaines autres propriétés (p.290). Pour Del Re (2000), les modèles sont constitués d'objets standardisés issus d'idéalisations adéquates (« *suitable idealizations* », p.9) d'objets réels, une idéalisation consistant à délibérément modifier certaines propriétés, par exemple assimiler un projectile à un point (Portides, 2007).

Le modèle doit toujours être considéré en relation avec le champ expérimental auquel il réfère, « *il est modèle de* » la partie de la réalité empirique délimitée pour les besoins de l'étude, et « *modèle pour* » répondre à une question ou un ensemble de questions sur cette partie de la réalité (Bachelard, 1979). Soler (2013) parle alors du modèle comme un outil efficace pour résoudre des problèmes particuliers, ceux pour lesquels il est opérant. « *Le modèle est un intermédiaire à qui nous déléguons la fonction de connaissance* » et à qui il est demandé de fonctionner de façon automatique sans que l'utilisateur s'en mêle (Bachelard, 1979). Les réponses apportées par la mise en œuvre du modèle permettent d'apprendre, de découvrir. Chamizo (2013) rappelle que certains modèles structuraux ont permis de synthétiser de nouvelles espèces chimiques et ont montré en cela que les modèles peuvent aussi agir d'une certaine façon sur la réalité.

Dans la mesure où les modèles ne rendent compte que de certaines caractéristiques de la réalité, il est tout à fait pertinent de considérer plusieurs modèles pour une même réalité permettant de répondre soit aux mêmes questions soit à des questions différentes.

1.2.1.5. Les fonctions des modèles scientifiques

Les différentes fonctions des modèles scientifiques ont été esquissées dans les paragraphes précédents. Un modèle scientifique vise à représenter la portion de réalité étudiée, expliquer les phénomènes questionnés, prévoir le devenir des situations étudiées rentrant dans son champ de validité et à découvrir (prédire) de nouveaux phénomènes, ce que l'on nomme le pouvoir heuristique d'un modèle.

La représentation fournie par le modèle peut s'effectuer via différents systèmes sémiotiques, au premier rang desquels le langage naturel, mais aussi via des langages spécialisés, langages mathématiques, langages de la chimie, fournissant soit des représentations symboliques soit matérielles (au sens d'objets que l'on peut manipuler).

Disposer d'un modèle permet d'expliquer. La nature des explications en sciences a donné lieu à beaucoup d'écrits (par exemple (Halbwachs, 1973 ; Hempel & Oppenheim, 1948 ; Friedman, 1974 ; Toulmin, 1973)). Sans rentrer dans le débat philosophique, il est courant de considérer que le modèle fournit une raison à l'enchaînement des événements étudiés (Soler, 2000). Cette raison est l'*explanans*, ce qui explique, et répond à la question « pourquoi » posée à propos de l'*explanandum*, ce qu'il s'agit d'expliquer au niveau expérimental. Les événements observés, peuvent se déduire d'un énoncé général (une loi) et de conditions particulières (initiales) relatives à la situation examinée. Il s'agit d'une explication déductive-nomologique (proposée par Hempel & Oppenheim, 1948) ou nomologico-déductive (Soler, 2000, Barberousse et al., 2000).

Une explication courante des phénomènes chimiques consiste à faire appel au modèle particulaire ou atomico-moléculaire de la matière. Halbwachs (1973) nomme ce type d'explication bathyène car mettant en jeu le niveau le plus profond et les structures sous-jacentes du système. Barberousse et ses co-auteurs (2000) soulignent que les explications atomistes (faisant appel à la théorie cinétique des gaz) ne sont pas des explications causales parce qu'elles visent « *la compréhension de la possession d'une propriété par un objet, sans faire référence à son acquisition au sens causal, selon des lois évolutives* » (p.110). Dans ce cas, l'explication a pour but de dire ce que signifie avoir une certaine propriété pour un objet étudié plutôt que de dire le pourquoi de cette propriété (Barberousse et al., 2000).

Différents philosophes (Friedman, Hempel et Salmon) selon Braaten & Windschitl (2011) font une distinction de nature entre compréhension et explication. La compréhension, concept psychologique, est engendrée par une explication, concept épistémologique, et constitue un critère subjectif du caractère explicatif d'un énoncé (Halbwachs, 1973).

Par la suite j'adopte le point de vue selon lequel un modèle scientifique est une construction intellectuelle regroupant un ensemble de concepts souvent interdépendants, qui permet de représenter, expliquer et prévoir, donc de répondre à un grand nombre de questions à propos d'un domaine restreint de la réalité expérimentale et qui est issu d'une ou plusieurs théories.

I.2.2. Les modèles scientifiques scolaires

Les modèles scientifiques scolaires (school science models) sont mentionnés comme étant couramment utilisés par les enseignants sans toutefois que la typologie proposée (Harrison & Treagust, 2000) repose sur des bases épistémologiques claires. Pour Adúriz-Bravo (2013, p.1605) un modèle scientifique scolaire est le résultat du processus de transposition didactique opérant sur un modèle scientifique qui a été sélectionné pour l'enseignement. La mention de la transposition didactique (Chevallard) n'est pas gratuite, elle vise à insister sur les choix faits par les concepteurs de programme ou les utilisateurs de tels modèles. Comme le précise Chevallard (1988 cité par Chamizo, 2013) les savoirs ne sont pas faits pour être enseignés mais utilisés, à quelques exceptions près, ce qui conduit à dire qu'un modèle scientifique est avant tout conçu pour être utilisé et non pas pour être enseigné, d'où une adaptation nécessaire pour atteindre les objectifs visés par l'enseignement. Cette adaptation n'est pas pointée par tous, certains précisent seulement que ce sont des modèles curriculaires ou modèles à enseigner (curricular models pour Gilbert, Boulter, & Elmer, 2000), qui constituent des versions parfois très simplifiées de modèles scientifiques. En effet selon le niveau de développement cognitif des élèves et les buts visés par l'introduction du modèle scolaire, celui-ci peut ne comporter que certains éléments ou caractéristiques du modèle scientifique dont il est issu, et ne valoir que pour un champ plus restreint. Une mission essentielle des enseignants consiste à permettre aux élèves de passer de leurs propres modèles parfois primitifs aux modèles scientifiques scolaires, et ce au moyen d'analogies, de métaphores (Izquierdo-Aymerich & Adúriz-Bravo, 2003) ou de modèles *ad hoc*, construits dans le contexte de la classe, que certains nomment teaching models (Gilbert, Boulter, et al., 2000) ou modèles enseignés.

Différentes études l'ont montré, les élèves ont des difficultés à comprendre la nature et le rôle des modèles. Ils ont tendance à ne voir dans les représentations qui leur sont fournies à partir de modèles que des copies de la réalité (Grosslight, Unger, Jay, & Smith, 1991), par exemple les modèles moléculaires seraient un grossissement des atomes et molécules (Morge & Doly, 2013) ; ou bien à imaginer la réalité à l'égal de représentations symboliques, par exemple lorsqu'il est demandé à des élèves de représenter un système gazeux à l'équilibre chimique certains font un dessin qui reproduit les caractéristiques de l'équation de réaction (Stavridou & Solomonidou, 2000), à savoir deux compartiments séparés comprenant les espèces situées de part et d'autre de la double flèche. Dans d'autres cas, l'objet du modèle est imaginé à l'égal de la réalité

empirique, lorsque des élèves attribuent une couleur aux atomes de cuivre (Ben-Zvi, Eylon, & Silberstein, 1986). Mieux faire comprendre le rôle et la nature des modèles consiste à faire modéliser les élèves. À quoi cela correspond-il ?

Dans l'enseignement-apprentissage des sciences, modéliser recouvre différentes significations. Selon Adúriz-Bravo (2013) quatre principaux sens du terme modéliser sont utilisés : inventer un modèle (construire un nouveau modèle), appliquer un modèle existant, améliorer un modèle existant, apprendre à utiliser un modèle dans une situation d'apprentissage scolaire. Pour d'autres auteurs, la pratique de modélisation par les élèves se traduit par quatre types d'action qui constituent des objectifs d'enseignement pour les enseignants : construction de modèles, utilisation de modèles, comparaison de modèles pour déterminer leur aptitude à rendre compte des phénomènes (évaluation), modification de modèles pour accroître leur pouvoir explicatif et prédictif (révision) (Schwarz et al., 2009). Il est important de noter que modéliser ne se réduit pas à construire un modèle, l'usage d'un modèle nécessite aussi un apprentissage, en témoignent les nombreuses difficultés des élèves comme les séquences spécifiquement dédiées à l'apprentissage d'un modèle (par exemple (Tiberghien, Vince, & Gaidioz, 2009)).

Les différents auteurs (didacticiens s'appuyant sur des considérations épistémologiques) pointent un certain nombre de caractéristiques essentielles des modèles scientifiques scolaires. Selon Morge et Doly (2013) un modèle scientifique scolaire a pour fonction première de répondre à un problème concernant une réalité empirique circonscrite pour construire un référent empirique qui soit manipulable et connaissable. La différence de nature entre le modèle et les objets qui le composent d'une part, et la réalité qu'il représente d'autre part, font qu'un modèle n'est ni vrai, ni faux (Ney, 2006), il est valide (ou pas) pour répondre à la question posée à propos de la situation expérimentale. Un modèle peut rendre compte de plusieurs situations différentes, un modèle particulière par exemple rend compte de la compression d'un gaz et du séchage du linge. L'explication produite par l'usage du modèle rentre alors dans la catégorie des explications unificatrices (Friedman, 1974). À l'inverse, une même situation expérimentale (ou un phénomène) peut être interprétée par plusieurs modèles (Gilbert, Boulter, & Rutherford, 1998; Morge, 2007; Morge & Doly, 2013). Proposer de tels questionnements aux élèves renforce la non correspondance (au sens d'image fidèle) entre le modèle et la réalité (Morge & Doly, 2013) et permet de travailler les critères choisis pour passer d'un objet de la réalité expérimentale à un objet du modèle, ce que Walliser (1977) nomme le code de modélisation. Une difficulté majeure pour les élèves (Tiberghien, 2000; Tiberghien et al., 2009; Tiberghien & Vince, 2005) consiste à faire le lien entre les relations et propriétés empiriques (qui sont les relations entre objets du niveau expérimental) et les relations syntaxiques (qui sont les relations entre objets du modèle), ce qu'on désigne parfois sous le terme de relations sémantiques (Robardet & Guillaud, 1997; Walliser, 1977). En d'autres termes, l'explicitation des relations sémantiques est déterminante pour aider les élèves à ne pas confondre le modèle avec le pan de réalité qu'il modélise.

Quelle que soit la façon de faire modéliser les élèves, les différentes recherches menées conduisent à dire que la réalité étudiée est (re)construite et n'est pas la réalité au sens commun du terme (Morge & Doly, 2013; Robardet & Guillaud, 1997; Sensevy & Santini, 2006), que le modèle ne doit pas être confondu avec la réalité qu'il étudie, ni avec une de ses représentations (Larcher, 1994; Morge & Doly, 2013; Talanquer, 2011). L'explicitation des codes symboliques utilisés doit permettre la distinction entre le modèle et les représentations utilisées pour en rendre compte (Larcher, 1994). Les différents systèmes sémiotiques pour représenter une même molécule (dans le modèle de la liaison de covalence) sont une occasion d'insister sur ce point (Khanfour-Armale & Le Maréchal, 2009; Le Maréchal & Cross, 2010). De plus utiliser différentes représentations d'un même modèle apporte différentes informations et participe d'une meilleure appropriation conceptuelle (Duval, 1993).

Ayant spécifié certaines caractéristiques des modèles, je vais maintenant préciser quelles sont les principales approches des modèles et de la modélisation dans les recherches sur l'enseignement de la chimie.

I.3. Approches des modèles et de la modélisation dans les recherches sur l'enseignement de la chimie

Dans cette partie, après avoir situé la nature des réflexions et recherches sur l'enseignement de la chimie dans les années 1980-90, je présente les deux principales approches des modèles et de la modélisation dans l'enseignement de la physique et de la chimie en France, qui sont celle de Martinand et celle de Tiberghien, pour montrer les différences ou les préoccupations différentes qu'elles révèlent et les points communs. Chacune de ces approches a directement inspiré certains travaux de Laugier et Dumon et les travaux de Le Maréchal, qui se sont intéressés spécifiquement aux modèles dans l'enseignement de la chimie.

I.3.1. Les recherches sur l'enseignement de la chimie dans les années 1980-90

Les chimistes manipulent des objets concrets verrerie, poudre, liquide, des appareils de mesure selon des démarches qui leur sont propres (Goffard, 1994), ils communiquent et interprètent avec des concepts (inclus dans des modèles) qui utilisent des représentations sémiotiques particulières (formules chimiques, équations de réaction chimique, formules stéréochimiques...) et d'autres communes à d'autres disciplines (équations mathématiques graphiques....). L'enseignement de la chimie se doit de reproduire cette spécificité, mais les enseignants doivent aussi prendre conscience des implicites qui sont alors véhiculés.

I.3.1.1. Le triangle de la chimie de Johnstone

Johnstone (1982 cité par Taber, 2013) le premier, évoque trois niveaux entre lesquels les chimistes naviguent librement dans une véritable gymnastique mentale, pour parler de chimie : un niveau descriptif et fonctionnel, un niveau de représentation et un niveau explicatif. Dans ses publications ultérieures (par exemple Johnstone, 1993) il place ces niveaux aux sommets d'un triangle (Figure 2) et déclare qu'il s'agit des trois composants de la nouvelle chimie : la chimie macroscopique du tangible, comestible, visible ; la chimie submicroscopique du moléculaire, de l'atomique, du cinétique⁸, et la chimie représentationnelle des symboles, des équations, de la stœchiométrie, des mathématiques.

⁸ Il est notoire que la cinétique chimique comprend des études expérimentales et l'établissement de lois macroscopiques.

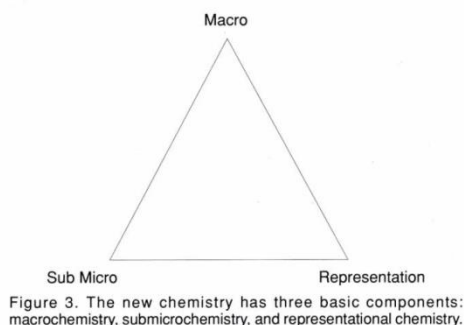


Figure 2 : le triangle de Johnstone (1993)

L'enseignant ou le chimiste est habitué à se déplacer à l'intérieur du triangle en ce sens qu'il passe facilement d'un point de vue à un autre, et qu'il mêle sans aucune difficulté les trois points de vue (Johnstone, 2006). Il en va tout autrement des élèves, qui restent proches du sommet macro et pour qui la confrontation simultanée à des substances non familières lors des travaux expérimentaux, des entités non perceptibles (les molécules) pour les interpréter et des notations symboliques spécifiques conduit à une surcharge cognitive (Johnstone, 2006). Johnstone se place dans une perspective de psychologie cognitive de type traitement de l'information, et explique les difficultés rencontrées par une surcharge de la mémoire de travail. Il préconise des séances préparatoires pour activer les connaissances de la mémoire à long terme et permettre ensuite un meilleur rattachement avec les nouvelles connaissances introduites en mémoire de travail (Johnstone, 1993). Johnstone n'est pas dans une perspective de modélisation et n'évoque pas ou peu la notion de modèle. Talanquer (2011), qui a fait une étude minutieuse des différents écrits de Johnstone, déclare qu'en focalisant sur les modèles particuliers de la matière dans le composant explicatif, Johnstone semble en écarter les modèles macroscopiques.

I.3.1.2. La dualité macroscopique-microscopique selon Barlet et Plouin

Barlet et Plouin (1994) visent à rendre compte du macroscopique par le microscopique et invoquent la modélisation lorsqu'ils détaillent les difficultés que pose l'équation de réaction. « *Si l'on veut dépasser le seul bilan matière et donner du sens à l'équation de réaction il convient de recourir au niveau atomique et moléculaire. On passe alors de l'observation, où la matière est continue, à la modélisation, où la matière est discontinue* » (Barlet & Plouin, 1994, p.29). « *En chimie ce qui est observable appartient au niveau dit macroscopique.(...) Ces observables macroscopiques sont les résultats de réactions et d'interactions entre des nombres gigantesques d'entités moléculaires, atomiques ou ioniques, constituantes du niveau dit microscopique* » (Barlet & Plouin, 1994, p.48). Le macroscopique est observable, tangible et est le résultat de ce qui se passe au niveau microscopique inaccessible. « *Cette dualité macroscopique-microscopique (observable-modélisable, concret-abstrait) est une spécificité et en même temps une difficulté de l'enseignement de la chimie. L'enseignant se déplace fréquemment, et souvent de façon implicite, entre ces deux niveaux* » (Barlet & Plouin, 1994, p.53). Il est indéniable que la dualité macroscopique-microscopique est spécifique de l'enseignement de la chimie et constitutive de la chimie moderne (Johnstone, 1993). Cependant, l'association des termes qui est faite indique que pour ces auteurs la réalité macroscopique n'est pas modélisable. Or il n'en est rien et cela rejoint une critique faite⁹, à propos de la thermodynamique, par Talanquer à Johnstone qui ne précise

⁹ Près de 30 ans après l'introduction du triangle de la chimie, ce qui témoigne de la persistance de ce point de vue consistant à ne considérer que les modèles microscopiques en chimie.

pas clairement dans quel composant du triangle il la situe. Où placer des concepts abstraits tels que l'entropie ou l'énergie interne dans ce triangle ? s'interroge Talanquer (2011), pour qui ces concepts macroscopiques font partie de modèles macroscopiques.

Cette conception dominante, consistant à privilégier les modèles microscopiques dans l'enseignement de la chimie, se retrouve dans les recherches didactiques menées à la même époque.

I.3.1.3. Les recherches sur les modèles particuliers de la matière en France

Les travaux des chercheurs au sein du LIREST (Laboratoire Interuniversitaire de Recherche en Éducation Scientifique et Technologique) et de l'INRP (Institut National de la Recherche Pédagogique) portent sur les modèles particuliers de la matière pour interpréter les propriétés thermoélastiques des gaz puis les trois états physiques d'une substance (Chomat, Larcher, & Méheut, 1988) à partir d'un germe de modèle fourni aux élèves de quatrième. Larcher, Chomat et Lineatte (1994) étudient la possibilité pour des élèves de cinquième qui ont déjà enrichi un modèle particulière afin d'interpréter les transformations physiques de la matière (Chomat et al., 1988), d'adapter ce modèle pour explorer un nouveau champ expérimental, celui des transformations chimiques. Ces recherches montrent que les élèves sont capables, moyennant un guidage adéquat, de rechercher des symboles qui leur permettent de rendre compte des observations effectuées et *in fine* de modifier le modèle initial (constitué de particules insécables et valable pour les transformations physiques de la matière) (Larcher et al., 1994). Les auteurs soulignent que les élèves ont articulé un travail sur les symboles avec une prise en compte des observations expérimentales pour aboutir à une nouvelle conceptualisation et un nouveau modèle de particules sécables au champ d'application différent du précédent modèle (Larcher et al., 1994). La symbolisation sert ici d'outil en conjonction avec l'expérimental pour construire le modèle particulière. Le symbolique, l'expérimental (l'observable) et le modèle sont intimement liés.

Ces recherches, parmi d'autres, ont alimenté le schéma de la modélisation de Martinand que je présente maintenant.

I.3.2. Le schéma de la modélisation de Martinand

Jean-Louis Martinand a synthétisé les travaux conduits à l'INRP et au LIREST qui visaient à « *transformer les contenus et les activités d'enseignement et d'apprentissage pour développer une maîtrise de la modélisation comme attitude et démarche intellectuelle utilisant certains outils* » (Martinand, 1992). Ces recherches ont permis de déterminer dans quelle mesure et quelles conditions les élèves sont capables de construire un modèle.

Deux schémas ont été produits résumant le processus dynamique de modélisation, l'un s'adressant à l'école et au collège, l'autre au lycée et au-delà (Martinand, 2014), et synthétisant les points-clés. Le référent empirique est un construit à partir duquel est élaboré le modèle ou ce que Martinand nomme « *l'élaboration modélisante* ». Le registre du référent empirique et celui de l'élaboration modélisante sont séparés, l'origine n'étant pas une réflexion sur la nature des savoirs scientifiques, mais une reconstruction d'un schéma de Vergnaud intitulé action et symbolisation (Vergnaud 1987 cité par Martinand, 1992) qui précisait les liens entre la réalité, les actions du sujet, les opérations mentales et les systèmes symboliques.

La fonction de ce schéma (Figure 3) est d'orienter les questions à résoudre par les concepteurs de la séance de modélisation pour « *déterminer les conditions d'un développement de la connaissance* » des élèves (Martinand, 1992).

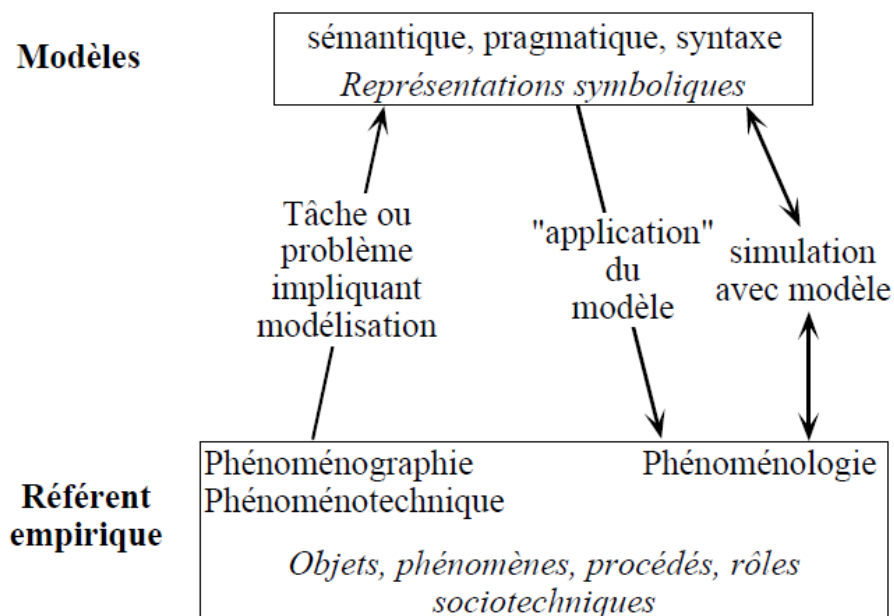


Figure 3 : Registre de modèles et registre du référent empirique (Martinand, 1998)

Le registre du référent empirique n'est pas uniquement constitué d'objets et de phénomènes, mais il comporte aussi des connaissances sur les objets, les règles à respecter pour conduire des expériences (phénoménotechnique). La phénoménographie constitue la description première de la situation expérimentale étudiée, qui se construit collectivement lors d'une étape au début de la démarche (Chomat et al., 1988) et met en jeu aussi des connaissances. Ces connaissances ont un statut empirique même si elles résultent de conceptualisations antérieures, parce qu'elles « sont inconsciemment projetées sur la réalité ». La phénoménologie est « la description seconde où le modèle se projette sur le référent empirique » (Martinand, 1998) et résulte d'une application du modèle une fois qu'il a été construit. Cela n'est possible qu'après avoir vérifié la cohérence externe du modèle, son adéquation au champ empirique étudié.

Le choix de la tâche ou du problème à proposer aux élèves pour les faire rentrer dans le processus de modélisation est crucial et nécessite une analyse fine de la conceptualisation attendue comme des appuis des élèves. Une fois construit, le modèle peut être mis en fonctionnement autonome (Bachelard, 1979), cela correspond à une simulation conduisant à des prévisions qui sont confrontées à la situation expérimentale. L'influence de Walliser (1977), se retrouve dans la mention de relations syntaxiques, pragmatiques et sémantiques qui désignent respectivement les relations entre objets du modèle, objets du registre empirique et les règles de correspondance entre propriétés des objets du modèle et celles des objets empiriques.

Le second schéma de la modélisation (Figure 4) complète le précédent (la référence à des niveaux d'enseignement plus élevés est assez récente, 2014, et ne figure pas dans les écrits antérieurs de Martinand) avec la matrice cognitive qui prend son origine dans la proposition de Christian Orange (1994) d'un paradigme explicatif qui sous-tendrait l'acceptation ou non du modèle par une communauté scientifique et aussi par les élèves. Il emprunte ce terme à Toulmin en l'appuyant d'une référence à un « réseau de nécessités naturelles » (Toulmin 1961 cité par Orange, 1994). Ce paradigme explicatif, qui doit être intellectuellement manipulable et admis comme explication, est une condition nécessaire à la maîtrise du modèle (Orange, 1994). La matrice cognitive vise à répondre aux questions portant sur les possibles, les ressources mobilisables qu'elles soient langagières, mentales, graphiques ou encore sur l'influence qu'elles peuvent avoir sur la réalisation de la tâche. Martinand emploie le conditionnel pour décrire cette

matrice cognitive inspirée de schémas d'intelligibilité (perspective sociologique due à Berthelot que cite Martinand) comprenant « *des paradigmes épistémiques (conception de ce que doit être la connaissance, les formes, des "bonnes pratiques" théoriques ou empiriques) et les ressources théoriques (langages, schémas, théories)* » (Martinand, 1998, p. 10), en bref ce qui correspond à une culture partagée concernant les modes de communication et les théories. Le langage de la chimie tout à fait spécifique (Jacob, 2001) doit faire l'objet d'un apprentissage avant de devenir une ressource théorique, des travaux francophones récents attestent des difficultés des élèves à ce sujet (Canac & Kermen, 2016; Dehon & Snauwaert, 2015a; Mzoughi-Khadhraoui & Dumon, 2012).

La nature de ces schémas est complexe. En 2014 Martinand écrit qu'ils sont des « *schémas didactiques des actes de modélisation scientifique et technologique* », dont il a précédemment indiqué le rôle de guide dans la conception de séquence. Il s'agit aussi de la représentation d'un processus incluant des objets, des connaissances sur ces objets, des descriptions ou raisonnements (qui articulent des connaissances) sur ces objets, des procédures d'action en situation expérimentale.

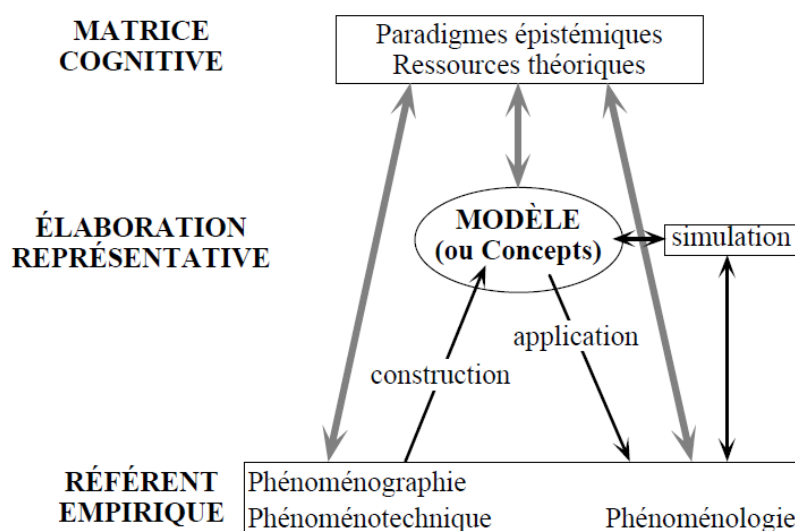


Figure 4 : Schéma de la modélisation (Martinand, 1998)

De façon plus simple, le schéma du processus de modélisation a été utilisé par Ganaras (1998) dans sa thèse, pour explorer la compréhension du concept d'équilibre chimique chez des étudiants en préparation au CAPES de physique-chimie. Il s'est intéressé à l'application du concept, c'est-à-dire aux explications que peuvent produire des étudiants à propos de questions qui leur sont posées et qui constituent la phénoménologie dans ce cadre (flèche application de la Figure 4). Il détermine au moyen de questionnaires papier-crayon si le savoir acquis est intégrateur et unificateur, donc s'il permet aux étudiants de produire des explications de phénomènes chimiques acido-basiques, qui mettent en jeu le concept d'équilibre chimique. La matrice cognitive est ici comprise comme « *l'ensemble des connaissances théoriques et pratiques d'un étudiant disposant d'un savoir opérant* » (Ganaras & Dumon, 2009). Selon l'appel ou non au concept d'équilibre chimique dans l'explication fournie, celle-ci est catégorisée comme relevant de la phénoménologie ou de la phénoménographie (dans le cas où les propos ne fournissent qu'une description en termes de concepts non spécifiques de celui d'équilibre chimique). La catégorisation effectuée est interprétée par un manque de connexion entre les connaissances théoriques et les connaissances expérimentales, le savoir des étudiants interrogés n'est ni opérant ni fonctionnel (Ganaras & Dumon, 2009).

I.3.3. Adaptation à la chimie du schéma de la modélisation de Martinand par Laugier et Dumon

À partir d'une revue de littérature Laugier et Dumon caractérisent les difficultés des élèves face au concept de réaction chimique comme relevant de deux « niveaux d'appréhension » (p.71) macroscopique et microscopique, que les élèves ne parviennent pas à relier notamment via l'utilisation du registre symbolique. (Laugier & Dumon, 2003).

Laugier et Dumon ne réfèrent pas à Johnstone, ce qui illustre la non diffusion à cette époque¹⁰ du triangle de la chimie en France et permet aussi de penser que le point de vue français sur la modélisation leur paraît plus apte à rendre compte de leur travail. Cet article provient d'une partie de la thèse d'André Laugier (soutenue en 1998) dans laquelle il s'appuie sur le schéma de la modélisation de Martinand pour produire un schéma applicable à la chimie. Dans l'article, ce schéma (modifié par rapport à celui de la thèse) devient celui de l'activité de modélisation avec disparition de la phénoménographie et de la phénoménotechnique et sans référence à Martinand. Le but de l'activité de modélisation est le remplacement de la « *phénoménologie privée de l'élève* » (qui désigne une interprétation incorrecte d'une observation) par la « *phénoménologie sociale des chimistes* ». La « *phénoménologie microscopique imaginée* » constitue l'intermédiaire qui permet cette substitution (Figure 5). Mais la phénoménologie des chimistes n'est pas précisée et il n'apparaît pas clairement en quoi elle diffère de la phénoménologie microscopique. On peut supposer que la phénoménologie imaginée a un statut transitoire dans le cadre des connaissances partagées dans la classe avant institutionnalisation mais ce point n'est pas abordé dans l'article.

Lors de la réalisation d'une succession d'expériences constituant le cycle de l'élément cuivre en classe de seconde, les élèves ont pour consigne de noter l'aspect des substances avant et après l'expérience, leurs observations et d'interpréter ce qui se passe dans le tube à essai. La citation suivante extraite de l'article illustre bien le fait que les élèves se sentent démunis pour répondre alors même qu'un modèle microscopique des transformations chimiques a été enseigné au collège. « *On nous demande de raconter ce qui se passe, mais on ne voit pas ce qui se passe. On voit des couleurs, on sent, mais on ne voit rien.* » (Laugier & Dumon, 2003, p. 85). L'utilisation du verbe voir, pour dire que rien n'est vu à part des couleurs montre bien que l'élève a conscience qu'il devrait « voir » quelque chose, en fait produire une explication impliquant des objets non perceptibles, mais il n'en est pas capable et le dit. À la différence de l'étude de Larcher, Chomat et Linéatte (1994) il n'est pas proposé aux élèves de travailler avec les représentations symboliques des substances ou des entités atomico-moléculaires pour expliquer leurs observations. De plus les élèves ne mobilisent aucune explication à caractère microscopique dans leur compte rendu écrit (Laugier & Dumon, 2003).

¹⁰ Cette perspective ne semble pas non plus reprise actuellement au contraire de ce qu'on peut voir en Belgique par exemple (Houart, Warzée, Wouters, Reniers, & Romainville, 2010).

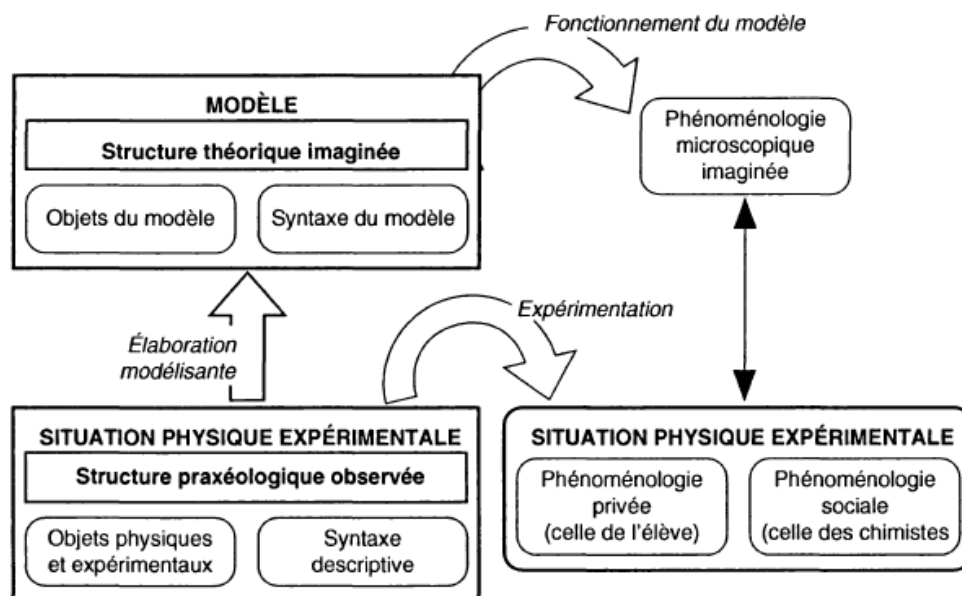


Figure 5 : schéma de l'activité de modélisation en sciences utilisé par Laugier et Dumon (2003)

Les auteurs constatent que si, lors de leurs discussions, les élèves mentionnent les molécules ou les ions (objets du niveau microscopique), ils n'ont pas l'idée de réorganisation de ces entités par dissociation ou assemblage pour former de nouvelles entités qui seraient les constituants des nouvelles substances (niveau macroscopique). Laugier et Dumon interprètent cela comme la manifestation d'un obstacle qui a perduré dans l'histoire des sciences jusqu'au XIX^e siècle. Ils soulignent que les élèves «*sont capables de prélever les indices phénoménologiques macroscopiques qui leur permettent de reconnaître qu'on a affaire à une réaction chimique*» mais «*restent prisonniers du registre macroscopique, celui de la phénoménologie observée*» (p.85) ce qui les empêche de fournir une explication de nature microscopique.

La perspective sur les modèles en chimie introduite par les auteurs du programme de 1999, à savoir la réaction chimique en tant que modèle macroscopique qui fournirait un premier type d'interprétation aux phénomènes étudiés, est postérieure à cette étude dans laquelle aucune prémisse de ce point de vue n'apparaît. Le seul modèle dont il est question pour fournir une explication est un modèle microscopique (particulaire) de la matière.

Alors que dans les travaux résumés par le schéma de Martinand il s'agissait effectivement de faire construire un modèle par les élèves, éventuellement à partir d'un germe de modèle, ici il s'agit que les élèves mettent en fonctionnement un modèle déjà enseigné pour expliquer des situations expérimentales (comme dans l'étude de Ganaras). L'accent est mis sur la partie gauche du schéma (Figure 5) présenté, plus développée que dans celui de Martinand. De plus, un certain décalage existe entre le texte de l'article et le schéma où la phénoménologie observée ne figure pas alors même qu'elle semble coexister avec la phénoménologie privée qui traduit les interprétations incorrecte des élèves. Ce schéma pose une difficulté d'interprétation dans la mesure où viennent se juxtaposer des connaissances de statut différent, appartenant à des acteurs différents, celles des élèves qui doivent être remplacés par celles des chimistes, le savoir de référence.

Le point de vue d'Andrée Tiberghien permet de faire disparaître cette difficulté.

I.3.4. Les deux mondes de Tiberghien

Dans les premiers écrits où apparaît ce qui deviendra le cadre des deux mondes, Andrée Tiberghien fonde ses choix sur une analyse épistémologique du fonctionnement de la physique. Selon Bunge (Bunge, 1973 cité par Tiberghien, Psillos, & Koumaras, 1994) le savoir de la physique fonctionne au niveau de la théorie, du modèle et du champ expérimental de référence qui sont trois niveaux distincts mais liés. Les constructions intellectuelles que sont les théories et les modèles ont un caractère hypothétique qu'il ne faut pas oublier ce qui implique de les différencier du niveau des objets et événements correspondant au monde matériel qu'étudie la physique (Tiberghien, 1994; Tiberghien et al., 1994). De plus ce caractère hypothétique entraîne la nécessité d'un processus de validation (Tiberghien, 1994; Tiberghien et al., 1994). Les théories contiennent les paradigmes (au sens de Kuhn cité par Tiberghien), principes, lois générales, le système explicatif tandis que les modèles sont constitués de relations fonctionnelles qualitatives ou quantitatives entre grandeurs physiques pertinentes pour représenter et rendre compte des phénomènes étudiés ou plus précisément d'une sélection des aspects de la situation matérielle (Tiberghien, 1994). Le champ expérimental de référence comporte les faits expérimentaux, les dispositifs expérimentaux, et les mesures (Tiberghien, 1994).

De la même façon Tiberghien (1994) considère que l'appréhension du monde matériel par les élèves peut être abordée du point de vue de la modélisation en considérant un niveau théorique, qui comporte les grands principes explicatifs tels que la causalité, et un niveau des modèles, qui s'opposent au niveau matériel. Tiberghien (1994) fait l'hypothèse que lorsqu'un(e) élève est face à une situation matérielle qu'il/elle doit expliquer ou prévoir, il/elle construit un modèle de la situation (une représentation) dépendant de son point de vue personnel. Cette analyse sous l'angle de la modélisation (Tiberghien, 1994) lui permet de montrer la cohérence des explications (incorrectes du point de vue de la physique) des élèves et d'envisager deux types de changement conceptuel : l'un correspondant à une modification de la structure du champ expérimental, l'autre à une modification du type de causalité invoquée donc au niveau théorique.

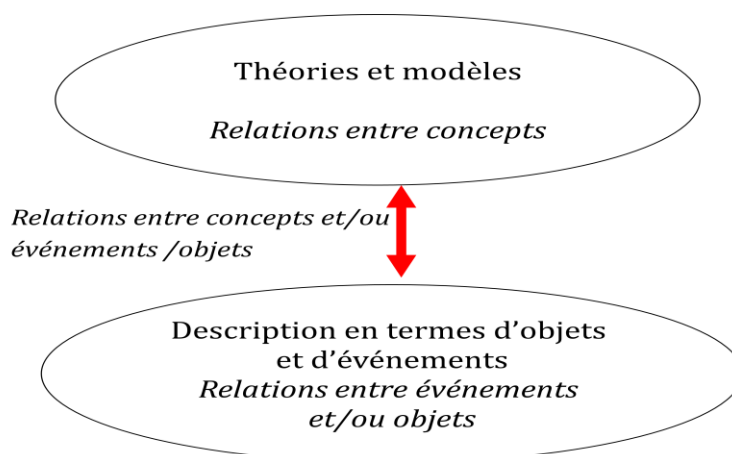


Figure 6 : les deux mondes (Tiberghien & Vince, 2005)

Dans ses publications ultérieures Tiberghien (1999; 2000) ne distingue plus la séparation entre théorie et modèle et considère que la difficulté majeure pour les élèves (qui devient alors un enjeu fort pour les enseignants) consiste à faire élaborer des relations (règles de correspondance) entre les concepts (au niveau théorique) et les objets et événements (au niveau expérimental ou quotidien). Le lien entre le monde des objets et événements et le monde des théories et modèles (Figure 6) est au cœur des séances d'enseignement-apprentissage et guide entre autres considérations la conception de séquences (Tiberghien et al., 2009).

Cette approche par la modélisation permet de catégoriser les types de savoirs, savoirs à enseigner et savoirs quotidiens (connaissances des élèves) et d'analyser finement les différentes relations à faire entre ces différents savoirs (Figure 7). L'étape de description du monde des objets et événements, préalable à toute modélisation, doit être explicitée (Tiberghien & Vince, 2005). Dans le cas d'une séance sur le son en seconde où les élèves travaillent en autonomie avec un haut-parleur et un générateur basses-fréquences, la situation familière (écoute d'un son plus ou moins fort) n'est pas décrite de façon physique en langue naturelle, il n'y a pas de lien qui soit fait par les élèves entre les deux parties du monde des objets et des événements (Figure 7) (Tiberghien & Vince, 2005). Cette liaison doit faire l'objet d'un enseignement spécifique et donc d'un apprentissage.

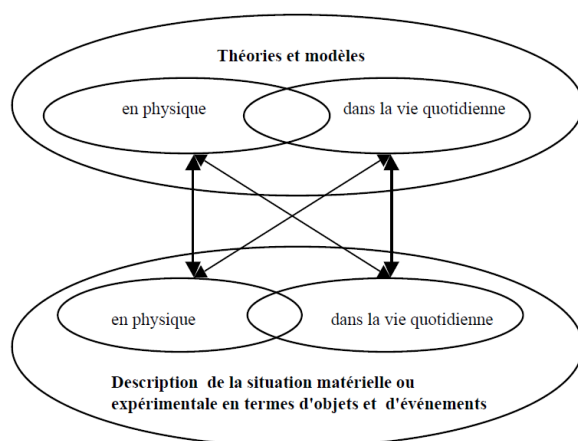


Figure 7 : les types de savoirs à partir de l'analyse en termes de modélisation (Tiberghien & Vince, 2005)

De même dans le cas de l'élaboration d'une séquence d'enseignement sur la mécanique en classe de seconde, cela donne lieu à un travail sur la langue pour passer d'une description commune à une description en termes pertinents du point de vue physique (Tiberghien et al., 2009), avant que les autres relations soient travaillées.

I.3.5. Adaptation des deux mondes à la chimie : le monde reconstruit de Le Maréchal

Les écrits (et les recherches) de Jean-François Le Maréchal constituent une intéressante adaptation à la chimie du cadre des deux mondes d'Andrée Tiberghien étalée dans le temps (entre 1999 et 2006) et présentant des variations qu'il peut être utile de pointer pour en rechercher les raisons. Il situe son travail comme une adaptation du point de vue de la modélisation qu'il oppose à l'autre approche généralement utilisée pour étudier l'apprentissage en chimie à savoir « *la mise en relation d'un monde macroscopique, d'un monde microscopique et d'un mode symbolique (Johnstone, 1993)* » (Le Maréchal & Bécu-Robinault, 2006).

Le Maréchal propose un modèle qui ambitionne de rendre compte de l'activité cognitive des élèves lorsqu'ils résolvent des problèmes simples en chimie (Le Maréchal, 1999b). Il considère que le monde réel peut être décrit de trois façons en termes d'objets, d'événements et de propriétés. Il ajoute que ces objets peuvent être décrits selon différents systèmes de représentations et que le monde réel est gouverné par des lois (Le Maréchal, 1999b), ce qui conduit à une partition du monde réel en cinq sous-domaines (Figure 8). Il ne précise pas si ce monde réel correspond au monde quotidien de Tiberghien. À l'instar de la physique, la chimie

utilise des modèles, des mesures, des interprétations de faits, mais s'en différencie par deux niveaux de description des objets (Le Maréchal, 1999a). Il prend l'exemple d'un liquide qui peut être considéré comme une chose ordinaire qu'on peut verser, mélanger à d'autres liquides. Mais il écrit qu'on peut aussi le considérer comme un ensemble de molécules avec les propriétés de ces molécules, il reprend donc l'approche généralement utilisée en chimie. Il fait le parallèle avec le physicien qui en modélisant une pomme la réduit à un point, alors que le chimiste la considère comme faite d'atomes qui sont des objets théoriques. Il choisit de décrire un monde reconstruit (celui que « *les chimistes ont dans la tête avec des molécules, des équations chimiques, des représentations spatiales de cristaux, des théories* » (Le Maréchal, 1999a, p. 70)) par une structure à cinq sous-domaines, identique à celle du monde réel (voir Figure 8).

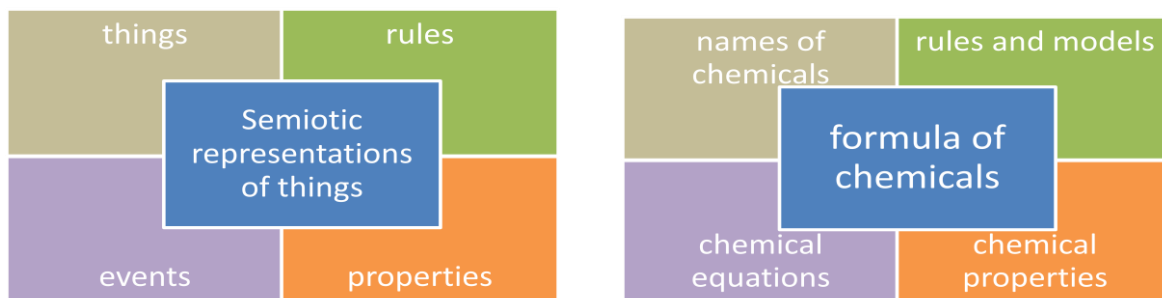



Figure 8 : représentation des deux mondes, le monde réel à gauche, le monde reconstruit à droite tel qu'il figure dans les écrits de 1999¹¹

La correspondance entre les sous-domaines est indiquée par un code couleur et la composition des sous-domaines figure dans le Tableau 1. À noter que dans l'article les noms des sous-domaines varient selon la figure, ainsi le sous-domaine violet du monde reconstruit est appelé aussi événements reconstruits (ce qui cadre mieux avec le descriptif du Tableau 1) ou événements, le sous-domaine en gris du monde reconstruit est aussi nommé espèces chimiques (chemicals). De plus les sous-domaines sont désignés par leur nom et des exemples de ce qui les constitue mais pas par une définition (Tableau 1).

¹¹ La piètre qualité des photocopies dont je disposais m'a conduit à reproduire ces schémas en y introduisant des couleurs pour une meilleure communication.

Tableau 1 : constitution des sous-domaines d'après (Le Maréchal, 1999a)

| Sous-domaines | Monde réel ou ordinaire | Monde reconstruit |
|--|---|---|
| Objets | Liquides, solides eau salée pas de correspondance verrerie | Substances chimiques Chlorure de sodium, molécule d'eau dioxygène, ion sodium pas de correspondance intéressante |
| Événements | Un liquide devient rouge Le gaz a explosé | La phénolphthaléine a été transformée en sa forme basique $2\text{H}_2 + \text{O}_2 \rightarrow 2\text{H}_2\text{O}$ |
| Propriétés | Le vinaigre a un goût acide Le liquide est bleu | L'acide éthanoïque est un acide de Bronsted La molécule a un niveau excité à 750nm au-dessus du niveau fondamental |
| Représentations (il précise qu'il n'y a pas correspondance) | Le mot liquide ou  | H_2O , H-O-H La molécule d'eau peut aussi être représentée par un dipôle, une fonction d'onde |
| Règles, théories, lois | Chauffer de l'eau la fait bouillir Pas de correspondance Pas de correspondance | L'enthalpie de vaporisation est toujours positive Règle de Hückel Théorie de Bronsted |

Pour Le Maréchal, il n'y a pas de distinction de nature à faire entre objets reconstruits macroscopique (les substances) et objets reconstruits microscopiques, ils appartiennent tous au sous-domaine des objets (ce qu'il écrit explicitement ultérieurement (Pekdag & Le Maréchal, 2001)). Une équation de réaction constitue un événement reconstruit associé à un événement réel (Le Maréchal, 1999b, p. 198) (Le Maréchal, 1999a, p. 71). Cette catégorisation pose problème dans la mesure où une équation de réaction est typiquement une représentation symbolique d'une réaction chimique, qu'on devrait alors retrouver dans le sous-domaine des représentations. Cela révèle une inhomogénéité dans l'appréhension des diverses représentations ou systèmes sémiotiques.

L'objectif affiché est de poser les bases d'une classification des difficultés des élèves (Le Maréchal, 1999a), il en donne quelques exemples, qui s'interprètent par des liens absents ou non pertinents entre différents domaines du monde reconstruit, mais ne poursuit pas systématiquement dans ses articles postérieurs.

Ultérieurement, Le Maréchal utilise des dénominations et une présentation des sous-domaines plus systématiques, mais surtout il réintroduit une séparation entre les connaissances relevant des théories et modèles qu'il oppose dans la nouvelle schématisation (comme Tiberghien ou Bécu-Robinault (1997)) au « monde perceptible » (nouvelle appellation du monde des objets et événements de Tiberghien qu'il annonce diviser en trois parties) et au monde reconstruit (Pekdag & Le Maréchal, 2001). Dans la Figure 9 j'ai reproduit la présentation qu'il en donne en 2001 en gardant le même code couleur que dans la Figure 8, ce qui permet de voir que le sous-domaine des représentations n'est plus mentionné et que deux domaines théories + modèles sont mentionnés sans qu'il soit dit à quoi cela correspond.



Figure 9 : présentation des mondes perceptible et reconstruit d'après (Pekdag & Le Maréchal, 2001)

Cette fois (Pekdag & Le Maréchal, 2001), il mentionne les réactions chimiques (non évoquées dans les écrits de 1999) qui sont des événements reconstruits que peuvent subir les objets reconstruits. Cette position est plus cohérente que la précédente qui ne concernait que les équations chimiques dont il ne parle plus, ayant omis les représentations. Il précise sa position quant aux transformations chimiques : « *Les programmes applicables en Seconde à la rentrée 2000 s'attachent à différencier une transformation chimique (ex. le jus de raisin qui fermente), qui est pour nous un événement perceptible* ¹²(on voit des bulles, ça sent l'alcool, ça a un nouveau goût), d'une réaction chimique (ex. le glucose qui devient de l'éthanol et du dioxyde de carbone lors de la fermentation) » (Pekdag & Le Maréchal, 2001, note 42). Parler de bulles, d'odeur et de goût relève effectivement d'événements perceptibles, cependant considérer qu'il s'agit de la même chose que dire « *le jus de raisin fermente* » est une prise de position qui mérite d'être argumentée. De mon point de vue une fermentation (qui est un terme spécialisé pour dire que des processus chimiques sont à l'œuvre) correspond à une interprétation de la situation expérimentale. De plus les difficultés des élèves à déterminer si des événements sont effectivement des indices de transformations chimiques sont bien connues (Chambenois, Bromont, Collard, & Morenas, 2003; Johnson, 2000; Méheut, 1989 ; Stavridou & Solomonidou, 1989; Tsaparlis, 2003) et une telle affirmation passe un peu rapidement sur ce point crucial. Une autre lecture de ces programmes est possible.

Dans ce cadre « *les produits chimiques ont deux statuts possibles* », objets perceptibles ou objets reconstruits, ce qui « *constitue un lien privilégié pour que l'élève mette en relation les deux mondes* » (Pekdag & Le Maréchal, 2001, p. 132). Lors d'une séance de travaux pratiques portant sur une expérience d'estérification, les élèves de seconde qui doivent décrire et interpréter ce qu'ils voient, « *fournissent essentiellement des arguments de type perceptible* » (Pekdag & Le Maréchal, 2001, p. 140). Cela montre que le passage entre la description commune (celle du monde perceptible) et une description chimique n'est pas immédiat du tout et qu'il doit faire l'objet d'un apprentissage, conclusion que les auteurs ne formulent pas.

Dans un article paru dans *Didaskalia* (Pekdag & Le Maréchal, 2006), il fournit une définition des différentes catégories de savoirs en chimie, ceux relatifs aux objets et ceux relatifs aux modèles, que l'activité de modélisation en référence à Tiberghien (1994) met en relation. Il explicite :

En chimie, il est approprié de distinguer, au sein des modèles, les connaissances relatives aux atomes, aux molécules, etc. ; ces derniers ont un statut d'objets appelés ici objets reconstruits, par opposition aux objets perceptibles. (...) Une réaction chimique, par exemple, sera un événement reconstruit et la faculté que possède une molécule de libérer un ion H⁺ sera une propriété reconstruite. (...) Les *objets perceptibles* peuvent être décrits par une relation entre un signifié, un signifiant, et une référence (Vergnaud, 1990). Les *événements perceptibles* correspondent à ce qui arrive aux objets perceptibles, comme le tube chauffé ou le liquide qui change de couleur. Les propriétés perceptibles aident à décrire ce qui est observé ; par exemple la couleur, le fait qu'un objet soit froid ou chaud...(Pekdag & Le Maréchal, 2006, p. 58)

¹² Souligné par les auteurs

Les définitions qu'il donne des constituants du monde reconstruit montrent qu'il ne se prononce pas véritablement sur la notion d'espèce chimique ou substance, pourtant abordée dans les films présentés aux élèves et dans ses écrits antérieurs. Elle est simplement mentionnée comme étant le point de départ de la signification d'une molécule, qui en est « la sous-division ultime ». Cette façon d'envisager le concept de molécule pose problème dans la mesure où elle favorise des conceptions considérant que les entités du niveau atomico-moléculaire ont des propriétés semblables à celle des substances du niveau macroscopique (Méheut, 1989).

- Les *objets reconstruits* sont les « objets » qui ont un signifié et un signifiant, mais pas de référent concret empirique (Sallaberry, 2000). Une molécule, par exemple, est un objet reconstruit. Son signifié peut être défini comme la sous-division ultime d'une substance qu'elle représente. Un signifiant peut être sa formule, une fonction d'onde, etc. En revanche, il n'y a pas de référent concret empirique qui montre cette molécule. De tels objets appartiennent à des modèles, mais, à l'instar des chimistes, il nous a semblé pertinent pour notre étude de leur donner un statut d'objet.
- Les *événements reconstruits* correspondent à ce qui arrive aux objets reconstruits. La déformation ou la dissociation d'une molécule sont des événements reconstruits.
- On peut considérer les *propriétés* des objets et des événements reconstruits, ce qui constitue une autre catégorie de connaissance comme par exemple : l'objet reconstruit « molécule d'ammoniac » est constitué de quatre atomes, l'événement reconstruit « transfert d'ion H^+ » est réversible, etc. (Pekdag & Le Maréchal, 2006, p. 59)

L'absence de référent empirique pour les entités atomico-moléculaire¹³ constitue une différence intéressante par rapport aux substances, concept macroscopique possédant un référent empirique.

Figure 1. Représentation des différents mondes perceptible, reconstruit et théorique permettant de catégoriser les connaissances mises en jeu en chimie par le savoir savant ou par les apprenants

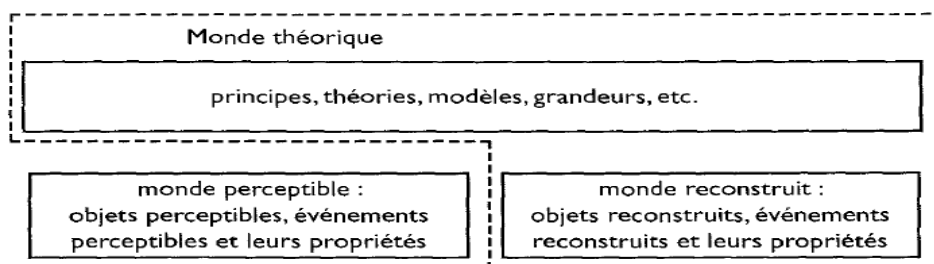


Figure 10 : catégorisation des savoirs en chimie en termes de mondes (Le Maréchal & Bécu-Robinault, 2006, p.86)

En 2006, il propose une nouvelle présentation de ces différents mondes et ne considère plus qu'un seul domaine théorique, le monde reconstruit (constitué des trois types de savoirs, objets, événements, propriétés) devenant une partie du monde théorique (Figure 10), ce qui constitue une évolution par rapport à ses premiers écrits. « *L'utilisation de théories, modèles ou grandeurs permet de prévoir comment évoluent les objets reconstruits, et donc ceux du monde réel* » (Le Maréchal & Bécu-Robinault, 2006, p. 86). Si l'on prend l'exemple de la grandeur concentration

¹³ Les images de microscopie électronique que l'on trouve dans certains livres ne constituent pas un référent empirique submicroscopique. (Henn, Boiteau, & Pépin, 2013)

d'un soluté dans une solution (qui permet d'une certaine façon de décrire l'objet reconstruit, est-ce une propriété ?), il est difficile de comprendre en quoi elle permet, seule, de déterminer comment évoluent les objets reconstruits. Il n'est pas fourni d'exemple de modèle scientifique scolaire qui serait utilisé par les élèves en classe à cet effet, sauf pour indiquer sur quoi reposent les simulations du monde submicroscopique (le modèle quantique invoqué est hors de portée des élèves), le monde théorique est désigné comme source de ces simulations sans plus de précision.

De même que Tiberghien et Vince (2005) pointent la difficulté majeure pour les élèves à faire des liens entre relations entre concepts et relations entre objets, Le Maréchal a expliqué certaines erreurs d'élèves par des liens inadéquats entre monde des objets et événements et monde reconstruit ou à l'intérieur des sous-domaines du monde reconstruit (version 1999). Mais il n'a pas spécifiquement étudié le rôle des modèles vis-à-vis des objets, événements et leurs propriétés pas plus que l'intervention de ces derniers dans les modèles. L'aspect sémiotique est évacué du schéma qui ne vise qu'à catégoriser les types de savoirs dans cette étude. Cela laisse la possibilité de représenter un concept ou un modèle à l'aide de plusieurs systèmes sémiotiques, pratique courante en chimie, sans déconnecter le modèle des systèmes sémiotiques utilisés pour le représenter.

La création du monde reconstruit est une idée très pertinente qui souligne les idéalizations et les abstractions faites par les chimistes. Le chimiste comme les élèves et les enseignants en classe, travaille avec des échantillons de matière qui comportent une ou plusieurs substances et dont la pureté n'est jamais absolue. Le Maréchal et un groupe d'enseignants (Le Maréchal et al., 2004) rapportent la nécessité de passer par une phase transitoire où l'enseignant introduit le terme de produit presque pur PPP qui correspond à l'échantillon du monde perceptible tandis que l'espèce chimique, concept abstrait qualifié de modèle, appartient au monde reconstruit (qui n'est pas cité dans l'article). Ceci permet de faire comprendre la notion de « pureté d'un produit » qu'on trouve dans les catalogues et sur les flacons de produits chimiques, un échantillon (le PPP glucose) contenant en très grande majorité l'espèce chimique (glucose) dont il porte le nom. Après une phase d'apprentissage, le terme PPP n'est plus utilisé, une fois que les élèves maîtrisent celui d'espèce chimique.

Pour résumer, Le Maréchal, qui s'appuie sur l'analyse de Tiberghien, arrive à un schéma de principe similaire, proposant une catégorisation des savoirs selon qu'ils relèvent du monde perceptible (ou matériel pour la physique) ou du monde théorique, mais avec deux différences notables :

- i) les connaissances des élèves (dans la vie quotidienne) sont mentionnées comme différentes des savoirs du physicien à atteindre, alors que ce n'est pas le cas dans le schéma concernant la chimie qui ne représente que les savoirs de référence ;
- ii) dans le monde perceptible qui correspond au monde de la situation expérimentale en physique, les propriétés complètent les objets et événements (comme dans le monde reconstruit). Ces propriétés, si l'on suit les exemples fournis, sont la manifestation d'interactions des espèces chimiques avec leur environnement (pour la couleur, interaction avec la lumière, pour l'acidité, interaction avec une autre espèce chimique basique) ou la mention de relation entre objets du modèle pour la composition d'une molécule en divers atomes. Ces propriétés peuvent être comprises comme des relations empiriques ou syntaxiques (respectivement).

Le schéma (Figure 10) permet à la fois la catégorisation des savoirs relevant de la chimie et les connaissances des élèves, sans appui sur un monde des théories et des modèles qui serait propre à chaque apprenant. Cependant aucun exemple de modèle scientifique scolaire en chimie n'est fourni pour analyser plus finement les savoirs issus du monde théorique. La création du monde

reconstruit est une véritable nouveauté par rapport à l'approche de Johnstone, à la fois parce qu'il relève d'une construction intellectuelle (abstraction et idéalisation) et parce qu'il ne différencie pas les objets macroscopiques et microscopiques (ce qui me paraît discutable car l'absence de référent empirique pour les entités du modèle microscopique, pourtant mentionnée à juste titre, permet de faire une différence notable). Le statut de ce monde reconstruit n'est posé clairement comme une partie du monde théorique que dans la dernière version, sans que le lien avec l'aspect expérimental soit bien précisé comme dans le schéma de Martinand.

I.3.6. Discussion

Bien que contemporains, les schémas de la modélisation de Martinand et Tiberghien, ne reposent pas sur les mêmes choix initiaux. Tiberghien a fait un choix¹⁴ de nature épistémologique en fondant ses analyses sur le fonctionnement du savoir en physique qui est pris comme référence. On pourrait dire en première approche que les pratiques du physicien sont prises comme pratiques sociales de référence (Martinand, 1986). Cependant, enseigner la physique et faire de la physique sont deux métiers différents (Tiberghien, 2014). La transposition didactique qui vise à apprêter le savoir de façon à le rendre accessible aux élèves et enseignable par étapes (Chevallard, 1985), conduit à introduire des concepts qui jouent un rôle d'échafaudage, et ne correspondent pas nécessairement à une construction reconnue par le physicien. À cet égard, j'ai assisté à une discussion entre Andrée Tiberghien et d'autres didacticiens de la physique (en 2014), qui lui demandaient en quoi le fait d'introduire le terme action mécanique avant celui de force (Tiberghien et al., 2009) était légitime dans la mesure où les physiciens n'utilisent que le terme force. À cette occasion Andrée Tiberghien a revendiqué la spécificité de l'action didactique qui doit disposer d'outils opératoires pour parvenir à ses fins.

Le choix initial de Martinand est plutôt de nature psychologique, même si la mention d'une phénoménotechnique évoque les écrits de G. Bachelard (dont il ne se réclame pas) et s'il axe sa présentation des schémas sur une analyse principalement didactique. Cependant, Orange (1994) et Larcher (1994) s'appuient sur S. Bachelard (1979) entre autres, pour compléter les analyses d'un point de vue épistémologique. Le cadre de Martinand, se veut plus général que celui de Tiberghien puisqu'il ne prétend pas s'appliquer à une discipline scolaire en particulier et qu'il a été élaboré à l'issue de plusieurs recherches à l'INRP portant sur différentes disciplines et à deux niveaux de l'enseignement, primaire et secondaire. Le cadre des deux mondes vise à analyser l'enseignement-apprentissage de la physique au lycée.

La spécification du schéma de Martinand à la chimie opérée par Laugier et Dumon, reste somme toute assez générale. La partie gauche du schéma (Figure 5) ne présente aucune caractéristique propre à l'enseignement de la chimie mais résume les caractéristiques générales du champ expérimental et du modèle. La partie droite mentionne trois phénoménologies dont deux ont un statut expérimental, la troisième fonctionnant au niveau du modèle. Le terme phénoménologie garde-t-il le même sens que dans le schéma de Martinand, cela n'est pas certain. Laugier et Dumon (2003, p.72-73) écrivent qu'elle « *correspond déjà à une certaine conceptualisation du réel* », mais néanmoins le fait d'avoir séparé la phénoménologie microscopique des deux autres pose question, puisque pour Martinand, la phénoménologie est résolument de nature expérimentale. Bien que publié après l'introduction de la réaction chimique considérée comme un modèle d'une transformation chimique, ce schéma repose sur une analyse antérieure qui n'envisage pas ce point de vue, et n'est donc pas suffisant pour en rendre compte.

¹⁴ Elle fait d'autres choix notamment liés à la façon dont l'élève apprend, ce qui la conduit à s'appuyer sur un cadre socio-constructiviste.

L'approche de Jean François Le Maréchal, s'inspirant de celle de Tiberghien, propose un schéma récapitulatif (dans sa dernière version figure 10) où trois mondes sont nommés, et où le monde reconstruit fait partie du monde théorique. Cette inclusion interroge, le monde théorique ne serait-il pas construit ? La dénomination « monde » a-t-elle la même signification dans les deux cas ? Cette approche est nouvelle au sens où elle s'émancipe de la distinction entre concepts macroscopiques et microscopiques alors que cette distinction, classique en chimie, vise à attirer l'attention sur la différence de nature entre propriétés des objets macroscopiques et celles des entités microscopiques. On peut s'interroger sur sa pertinence. Une tentative d'inclure le concept de transformation chimique, introduit par les programmes de lycée 2000 dans cette approche, se solde par une incompréhension du concept, puisqu'il est assimilé à un événement perceptible (voir des bulles, une couleur, etc...) donc à un état du système, alors que les auteurs du programme l'ont présenté comme mettant en jeu deux états d'un système.

J'aborde maintenant la présentation de mon adaptation de ces différentes approches, dont aucune ne me satisfaisait pleinement puisqu'elles ne faisaient pas une place suffisante au concept de transformation chimique et aux modèles macroscopiques, que mon analyse du savoir abordé par le programme avait révélés.

I.4. Approche tenant compte de la distinction entre transformation et réaction chimiques et entre modèles macroscopiques et « microscopiques »

Dans cette partie je présente l'état actuel de mon analyse épistémologique des concepts de transformation chimique et réaction chimique. Cette analyse a été amorcée lors de ma thèse (Kermen, 2007), puis affinée lors de la publication des articles parus dans des revues anglophones (Kermen & Méheut, 2009, 2011), éprouvée lors des cours de master que j'ai donnés, mise sous une nouvelle forme récemment (Kermen, 2015b) et remise en perspective pour cette note de synthèse.

I.4.1. Un schéma à trois niveaux

Prenant appui sur les distinctions opérées par l'épistémologie contemporaine (relayées aussi par des didacticiens Tiberghien et al., 1994) et parce que j'avais relevé des modèles empruntant à des champs théoriques différents, j'ai utilisé un schéma catégorisant les savoirs en termes de registre théorique, registre des modèles et registre empirique (Kermen & Méheut, 2009), dont la version actuelle, intégrant la réalité idéalisée et la réalité perçue introduites ultérieurement (Kermen & Méheut, 2011), est en figure 11.

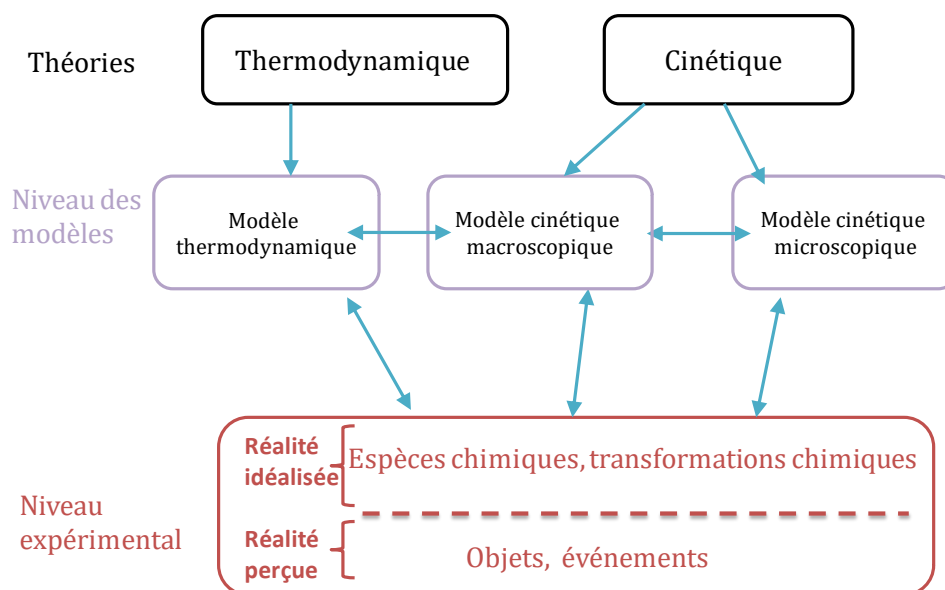


Figure 11 : Articulation des niveaux de savoir à propos de l'évolution des systèmes chimiques

L'appellation que j'ai donnée de ces trois niveaux ou registres a varié. Registre évoque une idée de collections, d'ensemble de connaissances tandis que niveau évoque une forme de hiérarchie, qui ici correspondrait à une abstraction croissante entre la réalité perçue (décrire une situation simplement nécessite néanmoins de disposer de concepts simples tels que couleur, liquide, solide etc.) et le niveau des modèles (celui des théories n'est pas abordé avec les élèves).

Le registre empirique est devenu niveau expérimental, sans qu'il faille y voir une raison autre que l'objection d'un des lecteurs, qui avait expertisé l'article de 2011, envers l'adjectif empirique. Les réflexions de Cariou (2015) rappelant la distinction faite par Dewey entre empirique (correspondant à une accumulation de faits) et expérimental (correspondant à des variations intentionnelles des conditions de l'expérience pour tester une hypothèse), donne corps à cette objection. Cependant, en classe il n'y a pas toujours d'hypothèse formulée préalablement et de modifications intentionnelles des conditions de l'expérience par les élèves, ou même par l'enseignant. L'appellation empirique garde donc une certaine pertinence.

I.4.2. Description d'une situation expérimentale: le concept de transformation chimique

Une transformation chimique correspond à un bilan macroscopique en termes d'espèces chimiques, effectué pour deux états d'un système fermé, ces deux états ne présentant pas la même composition. Ce bilan est un état des lieux bâti sur des observations, des mesures et des tests visant à mettre en évidence la présence ou l'absence de telle ou telle espèce chimique, et correspond à une description chimique. Il est précédé par une description de la situation expérimentale en termes d'objets et d'événements (modification de la couleur d'un liquide, formation d'un solide, valeur d'un pH, etc.), une description des phénomènes¹⁵ pourrait-on dire.

Prenons un exemple. Dans une première expérience, on dépose un petit morceau de fil rougeâtre dans un récipient contenant un liquide incolore. Dans une seconde expérience, on met un

¹⁵ J'ai parfois employé le terme description phénoménologique qui ne correspond pas à ce que Martinand nomme phénoménologie. Dans un souci de clarté, dans cette note, je n'utilise pas ce terme.

morceau de fil rougeâtre beaucoup plus petit que le premier, dans un même volume du même liquide incolore dans un autre récipient. Au bout d'un certain temps on remarque que les deux liquides se colorent en bleu et que chaque fil semble avoir changé de couleur (difficile de bien voir au travers du liquide bleu). On filtre le contenu de chaque récipient. Si on examine ce qui reste dans le papier filtre on constate que dans le premier cas, il y a un tout petit morceau de fil rougeâtre et plusieurs petits morceaux solides gris tandis que dans le second cas il n'y a que des petits morceaux solides gris et plus de solide rougeâtre. N'importe qui peut comprendre cette description pourvu qu'il sache ce que sont solides, liquides et couleurs. Un chimiste envisage la description différemment. Dans chaque récipient, on introduit un petit morceau de cuivre dans une solution aqueuse de nitrate d'argent. Au bout d'un certain temps, il se forme de l'argent sur les fils et la couleur bleue de la solution indique la formation d'ions cuivre. Il est possible de faire des tests (expériences) supplémentaires pour montrer qu'il y a toujours des ions argent dans le deuxième récipient, et plus dans le premier. Le point de vue chimique se résume de la façon suivante : dans chacune des expériences, les quantités de certaines espèces chimiques ont varié ; deux nouvelles espèces chimiques les ions cuivre et l'argent ont été formées tandis qu'une espèce chimique a disparu, les ions argent dans le premier cas, le cuivre dans le second cas. L'eau et les ions nitrate sont toujours présents, leur quantité n'a pas varié, ils n'ont pas participé au processus. Cela peut se schématiser de la façon suivante (Figure 12) :

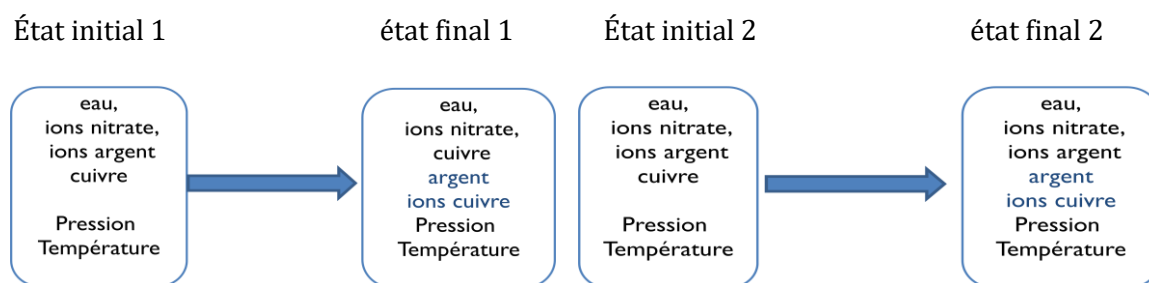


Figure 12 : Schématisation de deux transformations chimiques différentes mettant en jeu les mêmes espèces chimiques

Ces deux schémas (Figure 12) représentent deux transformations chimiques totales (il y a disparition d'une des espèces chimiques initialement présentes) différentes, mais présentant des caractéristiques communes qui permettent d'accéder ensuite à un autre niveau de savoir, celui du modèle permettant aussi de prévoir.

La description des événements met en jeu un premier niveau de savoir à propos de la situation expérimentale. Elle correspond à une première description du monde tel qu'on l'expérimente (the world-as-experienced (Gilbert, Pietrocola, Zylbersztajn, & Franco, 2000)), une description empirique de la réalité perçue (Gilbert, Pietrocola, et al., 2000).

La description chimique qui aboutit à reconnaître une transformation chimique mobilise un second niveau de savoir faisant appel à des concepts plus spécialisés, des concepts chimiques, ceux d'espèces chimiques, de solution etc. C'est une description idéalisée de la réalité, et les objets de ce niveau de savoir correspondent à la réalité idéalisée (Gilbert, Pietrocola, et al., 2000). Elle fait intervenir des objets-modèles (Bunge cité par (Gilbert, Pietrocola, et al., 2000)) qui sont dérivés d'objets réels et font ressortir leurs caractéristiques communes. Le concept de substance chimique présente les caractéristiques d'un objet-modèle au sens de Bunge. « *De tels objets sont temporairement considérés comme s'ils étaient la réalité de laquelle ils sont extraits* »¹⁶

¹⁶ "Such objects are treated temporarily as if they were the reality from which they were abstracted"

(Gilbert, Pietrocola, et al., 2000, p. 32). Dans la thèse j'avais seulement pris appui sur Martinand (2002) qui adopte un point de vue proche (mais sans référence épistémologique explicite) en considérant que les concepts disponibles pour décrire un système ont un statut empirique même s'ils découlent d'une conceptualisation antérieure, lorsqu'ils sont « *inconsciemment projetés sur la réalité sans plus de questionnement sur leur origine et leur validité* », il s'agit de ce qu'il appelle la phénoménographie. Dans cette réalité idéalisée, les objets principaux sont les espèces chimiques et les événements sont les manifestations de changements d'espèces chimiques qu'on résume par des transformations chimiques. Les termes de réalité perçue et réalité idéalisée ont alors conforté le choix fait précédemment et avec une deuxième légitimité.

Un objet-modèle étant un objet empirique idéalisé ne peut pas produire de connaissance par application directe d'un raisonnement logique, ce rôle est réservé au modèle qui permet des prévisions qui peuvent être testées empiriquement (Gilbert, Pietrocola, et al., 2000). En d'autres termes savoir quelles sont les substances chimiques présentes, ne permet pas de dire ce qui est susceptible de se produire si l'on ne dispose pas d'un outil prédictif. Ce rôle est assuré par le modèle. Connaître les propriétés d'une espèce chimique ne suffit pas (par exemple savoir que le nitrate d'argent forme un précipité en présence de chlorure de sodium), car cela ne permet pas de prévoir ni d'expliquer. Pour cela il faut mettre en œuvre un modèle qui mette en jeu la constante de solubilité et la solubilité du chlorure d'argent, ce qui permet moyennant une application aux conditions particulières de l'exemple considéré de prévoir effectivement si un précipité peut se former.

I.4.3. Modélisation des transformations chimiques totales

Reprenons l'exemple utilisé précédemment. Des essais répétés et des mesures associées ont montré que ce sont toujours les mêmes espèces qui se forment, l'argent et les ions cuivre, toujours dans une proportion constante. Il se forme toujours deux fois plus d'argent que d'ions cuivre, la quantité d'argent qui a disparu est égale à celle d'ions argent formée, de même la quantité de cuivre disparu est égale à la quantité d'ions cuivre formés et la quantité de cuivre consommée est toujours égale à la moitié de la quantité d'ions argent ayant disparu. Cette régularité vaut pour toutes les expériences mettant en jeu du cuivre et une solution de nitrate d'argent. À partir du moment où l'on considère qu'elle est valable pour toutes ces situations, voire pour une infinité, on définit un modèle, qui porte ici le nom de réaction chimique et dit quelles espèces chimiques réagissent ensemble (les réactifs, celles dont les quantités diminuent au bout d'un certain temps après mélange), lesquelles se forment et dans quelles proportions. L'écriture symbolique de la réaction chimique résume toutes les informations portées par le modèle, c'est l'équation chimique ou équation de réaction, ici $\text{Cu}_{(s)} + 2\text{Ag}^+_{(aq)} \rightarrow \text{Cu}^{2+}_{(aq)} + 2\text{Ag}_{(s)}$.

Il s'agit bien d'un processus de modélisation car il y a sélection des données : la présence des ions nitrate et de l'eau n'est pas mentionnée, tout comme la pression et la température, paramètres descriptifs du système, sont écartées. De plus il s'agit de répondre à un questionnement, comment parvenir à unifier tous ces phénomènes du même type pour pouvoir les représenter de façon économique, et les prévoir. Cette réaction chimique a un rôle prédictif dans la mesure où elle prévoit les espèces chimiques qui se forment (prédiction qualitative)¹⁷ et leurs quantités lorsqu'on connaît les quantités initiales de cuivre et d'ions argent (prédiction quantitative). Ce modèle n'est valide que pour les situations expérimentales mettant en jeu du cuivre et des solutions de nitrate d'argent, son champ de validité est très local.

¹⁷ Seule prédiction utilisée au collège et en seconde.

Le fait qu'une même réaction chimique interprète ou prévoit toute une famille de transformations chimiques faisant intervenir qualitativement les mêmes espèces chimiques mais correspondant à des résultats expérimentaux différents (par exemple Figure 12) peut constituer un levier pour amener à concevoir la différence de nature et de rôle des deux termes (Kermen, 2016a). Laugier et Dumon (2000) ont rapporté la surprise d'élèves de seconde devant des résultats expérimentaux perceptibles différents tous interprétés par une même réaction chimique. La schématisation présentée (Figure 13) permet de mettre en valeur l'unicité de la réaction chimique par rapport à la multiplicité des transformations chimiques, tout en restituant le caractère éminemment construit d'une transformation chimique, bilan constitué dans une réalité idéalisée.

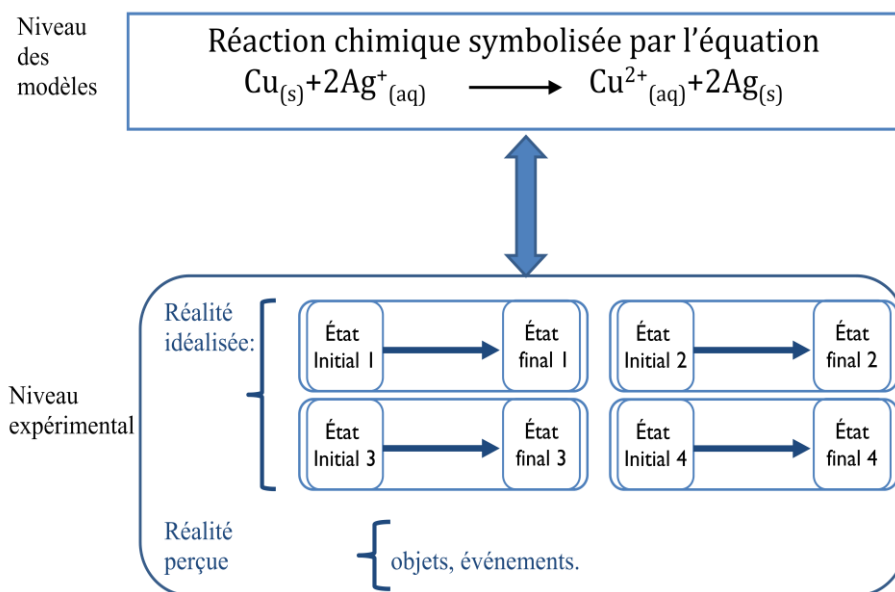


Figure 13 : Schématisation de la distinction entre transformation(s) chimique(s) (totale) et réaction chimique

Le pouvoir explicatif de ce modèle (la réaction chimique) est très pauvre, il ne permet pas d'imaginer comment les espèces chimiques peuvent se modifier pour former de nouvelles espèces. L'introduction d'un modèle particulière élémentaire, qu'on peut raffiner en précisant la constitution des particules selon le niveau scolaire considéré (molécules faites d'atomes dans un premier temps, puis atomes et molécules vus comme des assemblages de noyaux et d'électrons ce qui permet d'envisager la formation d'ions, de liaisons, etc.) vise à combler ce manque (Figure 14). Dans ce modèle rudimentaire une espèce chimique est un ensemble d'un nombre gigantesque d'entités identiques (atomes, molécules, unité anion-cation, ...). Un milieu réactionnel est formé d'entités en mouvement aléatoire constant qui peuvent en heurtant des entités d'une autre espèce chimique et en se dissociant ou se réarrangeant, former de nouvelles entités correspondant à une nouvelle substance. Cette explication, de type bathyène (Halbwachs, 1973) permet de proposer des images mentales aux élèves, et a aussi fait preuve d'une certaine efficacité dans la conceptualisation du concept de transformation chimique. Johnson (2000, 2002) a montré que des élèves de niveau collège n'arrivaient pas à reconnaître un changement de substance (et donc à concevoir une possible transformation chimique) à partir des seuls critères macroscopiques qu'on leur proposait (point de fusion, couleur, etc.) mais que le recours à un modèle particulière avait permis de franchir cette étape.

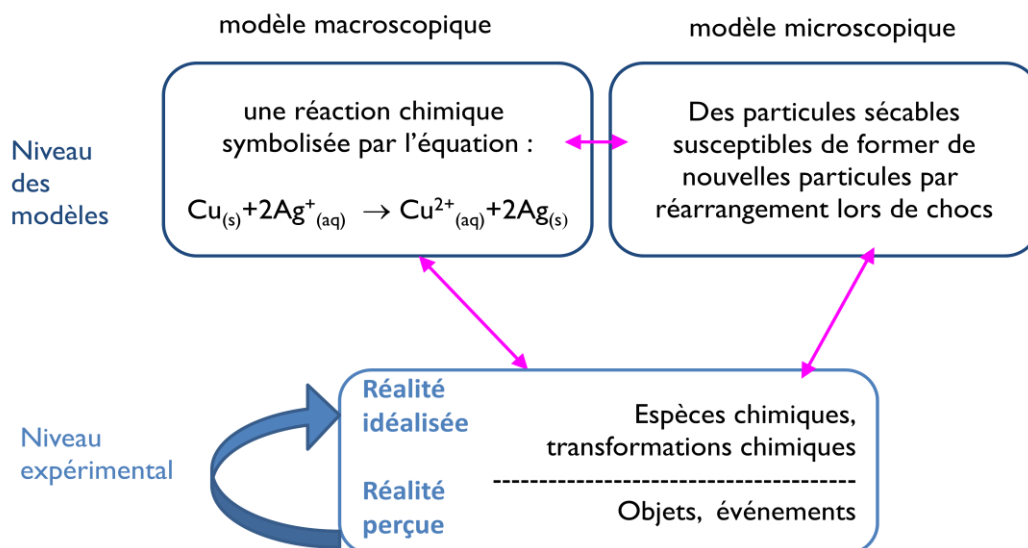


Figure 14 : articulation du niveau expérimental et du niveau des modèles pour des transformations dites totales

I.4.4. Entre catégorisation des connaissances et schéma d'actes de modélisation

Ayant présenté de façon détaillée le niveau expérimental, et une partie du niveau des modèles qui m'ont permis de caractériser les raisonnements d'élèves (Kermen & Méheut, 2009, 2011), il me paraît nécessaire de revenir sur les choix que j'ai effectués pour les comparer à ceux faits par d'autres chercheurs.

L'idée de séparer le niveau expérimental ou registre empirique en deux parties, provient des influences croisées de Martinand (avec la phénoménographie) et Le Maréchal qui sépare le monde sensible du monde reconstruit. Cependant, contrairement à ce que propose Le Maréchal et en accord avec les recherches synthétisées par les écrits de Martinand, j'ai considéré que la seconde partie de ce registre (qui devient plus tard la réalité idéalisée) devait conserver un caractère empirique ou expérimental, n'ayant pas de pouvoir explicatif ni prédictif, qui me paraissent être des attributs essentiels d'un modèle. Il est clair que cette seconde partie comporte des connaissances correspondant à des concepts, mais les relations entre les concepts à ce niveau, ne permettent ni prévision, ni explication. La lecture des réflexions de Gilbert, Pietrocola, et leurs co-auteurs (2000) autour des écrits de Bunge¹⁸ est venue conforter ce choix.

La description chimique intervenant au second niveau du registre empirique ne met en jeu que des concepts macroscopiques, ce qui légitime à mes yeux le fait de cantonner les molécules, atomes et ions dans un modèle. Bien qu'adoptant une position réaliste, je crois à l'existence d'entités atomico-moléculaires, je ne considère pas que l'on dispose de faits empiriques atomico-moléculaires en milieu scolaire. On ne peut pas toucher (voir) une molécule comme on touche (voit) un échantillon de matière (une solution de sulfate de cuivre par exemple). Je me suis d'ailleurs posé la question de l'existence d'un niveau empirique microscopique, à propos duquel la profusion d'images issues des diverses techniques de microscopies électroniques que l'on trouve maintenant dans les manuels pourrait donner à penser qu'il est pertinent. François Henn

¹⁸ Tiberghien dans ses premiers écrits (Tiberghien, 1994 ; Tiberghien et al., 1994) utilise aussi un schéma à trois niveaux en se réclamant explicitement de Bunge.

(Henn, Boiteau, & Pépin, 2013) considère que ces représentations figuratives accentuent les risques de confusion entre réalité et concepts, risques dus à l'oubli des modèles avec lesquels travaille l'ordinateur qui les génère et à l'aspect virtuel du rendu obtenu.

Suivant Le Maréchal et en contraste avec ce que propose Tiberghien, le schéma que j'ai utilisé permet de catégoriser le savoir à enseigner, mais ne met pas sur le même plan les connaissances des élèves, que je n'ai pas particularisées. Ce schéma dans une version plus élaborée et cantonnée au modèle thermodynamique et au niveau expérimental a servi de grille d'analyse des réponses d'élèves qui devaient dire si différentes situations expérimentales décrites donnaient lieu à changement (transformation chimique) ou pas (Kermen & Méheut, 2011). Certaines erreurs récurrentes ont été interprétées en termes de liens inadéquats ou absents entre le niveau du modèle et le niveau expérimental.

Au collège, lors des premières confrontations à des transformations chimiques, le point crucial et à construire est le passage de la réalité perçue à la réalité idéalisée (flèche bleue dans la Figure 14). Mais cela se fait aussi en conjonction avec le niveau du modèle en utilisant le modèle microscopique pour donner corps au concept d'espèce chimique. Les concepts d'espèces chimiques et de transformations chimiques 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 je l'ai déjà écrit, la réalisation d'expériences de même nature mais fournissant des résultats perceptibles différents doit servir de levier pour faire la différence entre le concept de transformation chimique (totale) et celui de réaction chimique. Le caractère de modèle de la réaction chimique implique qu'elle doit ensuite être utilisée pour prévoir ou expliquer des événements passés ou à venir. Pour contraster l'unicité de la réaction chimique et la multitude de transformations chimiques totales interprétées ou prévues par la réaction (dans ma thèse et les articles de 2008, 2009 et 2011, je parle d'une infinité), il me paraît intéressant d'utiliser l'expression famille de transformations chimiques (Kermen, 2015b) que j'ai employée dans mes cours de master. L'idée de famille rappelle les aspects communs (ce sont les mêmes espèces chimiques qui sont en jeu) mais il peut y avoir des différences (les quantités en présence sont différentes et le réactif limitant n'est pas toujours le même). Cela reste cependant une proposition à tester en classe.

Placer le concept de transformation chimique dans la réalité idéalisée, le second niveau du registre empirique, est un choix qui m'autorise à comparer cette création didactique avec celle d'action mécanique utilisée par Tiberghien et ses co-auteurs (2009). Transformation chimique et action mécanique ont une certaine parenté épistémologique et didactique, toutes deux correspondent à une conceptualisation du monde sensible et donnent lieu à une représentation sémiotique codifiée tout en étant le préalable à l'accès à un élément du modèle de l'évolution des systèmes chimiques (la réaction chimique pour l'une) et un élément du modèle de l'évolution des systèmes mécaniques (la force pour l'autre). Toutes deux peuvent être considérées comme des créations didactiques facilitant l'accès aux modèles pour les élèves.

En accord avec Tiberghien, Martinand et Le Maréchal, les schématisations proposées ne séparent pas le registre symbolique des différents niveaux mis en jeu dans les opérations de modélisation bien que la place des représentations sémiotiques soit importante, que les symboles puissent jouer un rôle dans l'élaboration d'un modèle particulière pour rendre compte de transformation chimique par des élèves (Larcher et al., 1994). Je discute ce point maintenant.

I.5. Quelle place donner aux systèmes sémiotiques ?

Un point commun aux cadres de la modélisation que j'ai présentés (voir I.3), est l'absence de référence explicite aux systèmes sémiotiques dans le schéma récapitulatif, à l'exception de celui de Le Maréchal dans sa première version. Cependant leur importance est reconnue, ils constituent une autre façon d'aborder le savoir (Tiberghien et al., 2009). Dans le cas de celui de Martinand, cela se conçoit puisqu'il est très général et que les systèmes sémiotiques utilisés, de même que la langue naturelle¹⁹, varient d'une discipline à l'autre. Dès que le cadre des deux mondes est appliqué à un domaine particulier de la physique, comme celui de la mécanique élémentaire (Tiberghien et al., 2009), Tiberghien souligne l'importance de la coordination entre systèmes sémiotiques variés tels que les diagrammes représentant les actions mécaniques, les vecteurs représentant les forces, la langue naturelle faisant le lien entre ces différents systèmes pour accéder à la signification des concepts. Il en est de même pour les autres, dès qu'un exemple précis est mis en œuvre, au moins deux systèmes sémiotiques sont utilisés (langue naturelle et symboles) dès lors que des formules chimiques sont écrites ou nommées.

Les systèmes sémiotiques servent à communiquer des concepts, des idées et sont donc indispensables pour faire connaître les modèles (réseaux de concepts ou idées organisées de façon particulière). Dans l'approche de l'évolution des systèmes chimiques fondée sur une prise en compte des modèles que j'ai présentée (I.4) je n'ai pas jugé nécessaire de déconnecter les différents systèmes sémiotiques utilisés pour présenter les modèles, de ces derniers. En effet ces divers types de représentations font partie intégrante de l'utilisation de ces modèles, ce qui n'enlève rien à la nécessité d'y faire attention, mais comment, par exemple, exprimer la grandeur quotient de réaction sans utiliser son écriture formelle ? Comment rendre compte des réactions chimiques sans la notation symbolique des espèces chimiques et de l'équation de réaction ? Comment présenter les trois cas (inégalités et égalité) correspondant à la comparaison de la valeur du quotient de réaction à celle de la constante d'équilibre autrement qu'avec des sigles mathématiques ? Cela répond à un souci d'économie dans la présentation (on pourrait presque tout dire avec des phrases, mais cela prendrait beaucoup de place par écrit).

I.5.1. Du triangle de la chimie au tétraèdre

Les didacticiens de la chimie anglophones parlent plutôt de représentations que sont les symboles, les formules et les équations (Johnstone, 1993) ou plus récemment de modes de représentation qui sont matériel, visuel, verbal ou mathématique (Justi & Gilbert, 2002b). Le triangle de la chimie de Johnstone a été l'une des idées les plus puissantes et productives en didactique de la chimie durant les 25 dernières années selon Talanquer (2011). Présenter un schéma à trois niveaux qui n'en fasse pas mention constituait une anomalie pour l'un des lecteurs ayant révisé ma proposition d'article soumise à la revue *Chemistry Education Research and Practice* à l'automne 2008. Pour répondre à la demande de ce lecteur anonyme, j'ai transformé le triangle de Johnstone en tétraèdre où le niveau des modèles et le niveau empirique sont connectés au niveau symbolique (Figure 15). Mon intention était de mettre en évidence l'existence de modèles macroscopiques dont il n'était pas question dans l'approche de Johnstone. Non mis à l'épreuve, ce tétraèdre avait juste vocation à faire un pont entre un schéma extrêmement populaire et celui que je proposais.

¹⁹ L'usage de la langue naturelle dans chaque discipline présente des particularités qui ne sont pas sans poser des difficultés aux élèves et qui nécessitent aussi un apprentissage, ce que certains nomment la langue ordinaire modifiée (Dehon & Snauwaert, 2016)(Jacob, 2001).

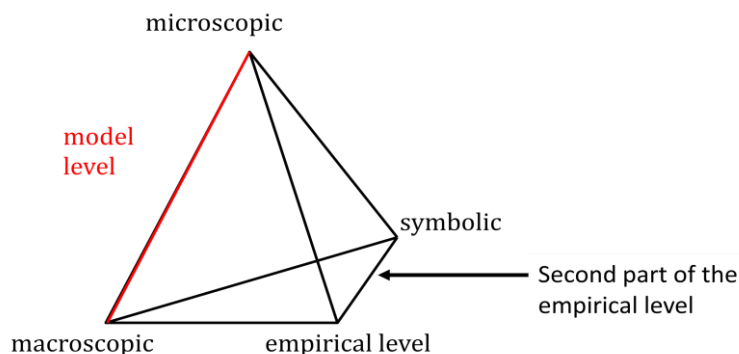


Figure 15 : Niveaux des modèles et niveau empirique liés aux représentations symboliques (Kermen & Méheut, 2009)

Dans l'explicitation de ce qu'il signifie, j'indiquais qu'un enseignant effectuant une description en termes d'objets et d'événements (la réalité perçue) se situerait près du sommet empirique. Un enseignant parlant d'une réaction chimique sans formule chimique se situerait près du sommet macroscopique, et glisserait le long de l'arête du macroscopique vers le symbolique s'il utilisait des formules chimiques. Un enseignant montrant une animation particulière serait autour du sommet microscopique, et se déplacerait le long de l'arête vers le sommet symbolique s'il interprétait cette animation à l'aide d'une équation de réaction élémentaire (Kermen & Méheut, 2009). Ce dernier point me paraît maintenant très discutable dans la mesure où une animation est constituée de représentations virtuelles fondées sur des modèles microscopiques, avec un caractère symbolique marqué, puisqu'un code existe pour indiquer ce qui est représenté (tel atome correspond à une sphère de telle couleur par exemple). Un enseignant montrant une animation serait sur l'arête en question. Cela soulève la question de ce que l'on met véritablement au sommet symbolique, aspect auquel je n'avais pas suffisamment réfléchi, mon intention n'ayant pas été de considérer les représentations symboliques pour elles-mêmes. Je n'avais pas mentionné la signification du côté empirique-microscopique, retrouvant là le problème de l'existence du niveau empirique microscopique inaccessible directement²⁰. Et la flèche désignant le second niveau du registre empirique (la réalité idéalisée) n'indiquait pas précisément où je le plaçais, à mi-chemin entre l'empirique et le symbolique, ou bien dans la base du triangle macroscopique-symbolique-empirique, pour accréditer l'usage de représentations symboliques dans la description chimique conduisant aux transformations chimiques. Imitant Johnstone (1993), je l'avais proposé pour montrer les différents passages d'un niveau à l'autre, et les difficultés de compréhension que cela pouvait générer chez les élèves. Malgré ces impensés, le tétraèdre ne fut pas rejeté sans doute parce qu'il permet une certaine conciliation entre les deux points de vue (le mien et celui de Johnstone).

1.5.2. Le tétraèdre à l'origine d'un cadre d'analyse

En dépit de ses manques, et avec quelques précisions supplémentaires apportées qui ne portent cependant pas sur l'arête empirique-microscopique, le tétraèdre a servi de support à la création d'un tétraèdre appelé expansion du triplet de la chimie (Figure 16) pour faire une analyse comparative du discours de trois enseignants tunisiens (Dumon & Mzoughi-Khadhraoui, 2014). L'analyse visait à déterminer les différences ou similarités dans la façon de relier le registre expérimental au monde des théories et modèles correspondant à une face du tétraèdre lors de

²⁰ Talanquer (2011) souligne que les technologies modernes permettent aux chimistes d'explorer la matière au niveau atomique et de manipuler des particules de taille nanométrique, ce qui nécessite de considérer que le monde accessible à l'expérimentation n'est plus seulement macroscopique (p.186).

l'enseignement des transformations chimiques pour la première fois (Dumon & Mzoughi-Khadhraoui, 2014). Le principal résultat est le faible nombre de connexions faites par les enseignants observés entre le registre expérimental et le registre des modèles, ce qui explique en partie les difficultés des élèves constatées par ailleurs à résoudre les exercices de stœchiométrie classiques.

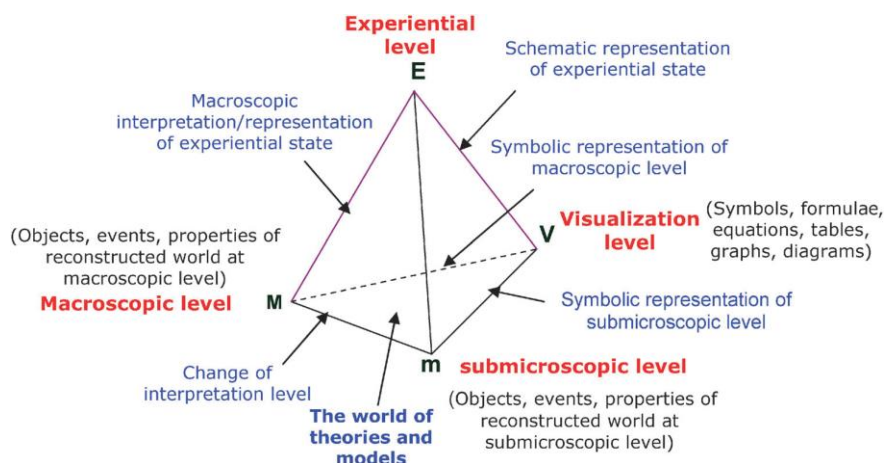


Figure 16 : expansion du triplet de la chimie (Dumon & Mzoughi-Khadhraoui, 2014)

I.5.3. Le tétraèdre discuté

Se fondant sur une analyse à caractère linguistique du langage symbolique de la chimie, et prenant le cas de l'équation de réaction dans l'enseignement secondaire en Belgique, Dehon et Snauwaert (2015b) s'interrogent sur la signification du lien empirique-symbolique dans le tétraèdre²¹ (Kermen & Méheut, 2009). Pour eux, la relation n'est pas valide car ils considèrent que l'écriture d'une équation de réaction mobilise des concepts macroscopiques (placés au sommet macroscopique), et qu'elle ne peut être directement issue du niveau de savoir strictement empirique. La relation macroscopique-empirique ne doit pas être mise sur le même plan que la relation symbolique-empirique (Dehon & Snauwaert, 2015b). Ils qualifient le lien entre écriture symbolique et niveau empirique d'indirect, car les formules chimiques sont des représentations de concepts macroscopiques (ou microscopiques) (Dehon & Snauwaert, 2015b).

Effectivement il est souhaitable que les élèves mobilisent des concepts macroscopiques ou microscopiques pour écrire une équation de réaction en lien avec une situation expérimentale (les difficultés de Chloé en attestent, cf II.1.1.1). Cependant si l'écriture d'une équation de réaction est vue comme la manipulation de symboles dont il s'agit de respecter le nombre et les codes d'écriture, il n'y a pas de passage par des concepts chimiques macroscopiques ou microscopiques. Certains élèves qui ne savent pas quelles significations attribuer à l'équation de réaction sont cependant tout à fait compétents pour l'écrire (Talanquer, 2011). La relation pourrait être alors directe entre l'empirique et le symbolique. De façon similaire Beaufils et Richoux (2003) ont souligné la tendance d'élèves dans le cadre de TP de physique informatisés, à passer directement du réel au monde des signes, du phénomène à l'écran d'ordinateur, sans passer par les idées qui donnent sens à ces inscriptions.

²¹ Ils ne questionnent pas l'arête empirique-microscopique.

Sortir le niveau symbolique de la présentation des niveaux empirique, des modèles et théorique²² pour le situer à un sommet du tétraèdre l'exhibe et lui confère un statut équivalent à celui des autres sommets. Ce n'est pas totalement pertinent et ce n'était pas l'intention initiale. Un rôle essentiel de ce niveau est la communication (qui n'est pas celui des autres niveaux), ce que Le Maréchal avait pris en compte dans la formulation adoptée en le qualifiant de mode symbolique par rapport aux deux autres niveaux de savoir considérés comme des mondes (Le Maréchal & Bécu-Robinault, 2006). De plus, la représentation de ces niveaux de savoir est un peu réductrice par rapport aux schémas à deux ou trois niveaux que j'ai proposés (ou ceux de Martinand, Tiberghien, Le Maréchal) qui comportent une rupture entre le niveau des modèles et le niveau empirique. Cette rupture est là, tout à la fois pour indiquer qu'il y a des liens à faire entre les niveaux et que ces liens (relations sémantiques) sont sources de difficultés d'apprentissage (Tiberghien & Vince, 2005), et qu'il y a lieu de différencier modèles et la réalité qu'ils représentent, donc les savoirs sur les modèles et les savoirs sur la réalité. Adopter une représentation continue (l'arête entre deux sommets) gomme cet aspect, essentiel de mon point de vue, puisqu'il conditionne l'interprétation d'une même situation par plusieurs modèles, et la possibilité de proposer des modèles plus évolués au fur et à mesure du développement des capacités cognitives des élèves.

I.5.4. Au-delà du tétraèdre

Selon Taber (2013) le niveau symbolique n'a pas à être pensé au sein d'une « triade ontologique macro-submicro-symbolique » parce que cela ne procure aucune aide lors de l'apprentissage. Il rappelle que Johnstone avait introduit ce domaine symbolique parce qu'il constituait un surplus de connaissances à acquérir pour les élèves et que cela méritait toute l'attention des éducateurs.

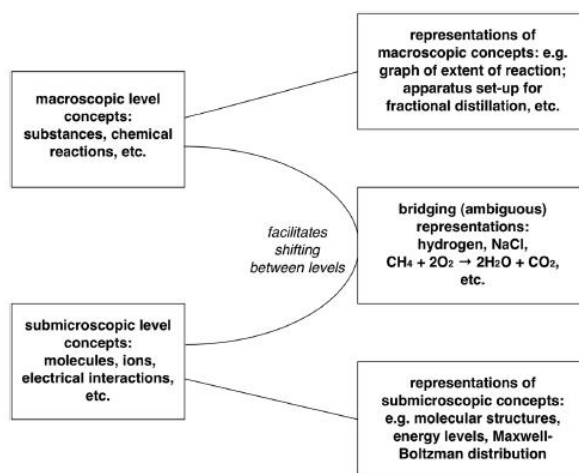


Fig. 3 The symbolic domain as providing resources for representation and communication of chemical concepts, and in particular for supporting the development of explanations relating the two conceptual levels.

Figure 17 : Le domaine des représentations ambiguës, pont entre concepts macroscopiques et microscopiques (Taber, 2013)

Taber (2013), reprenant certaines des critiques²³ faites au triangle de Johnstone, par Talanquer (2011) propose de considérer deux domaines conceptuels, celui des concepts macroscopiques et

²² Signalons que les différents auteurs (Johnstone, Talanquer, Justi & Gilbert, Dehon & Snauwaert) ne parlent pas des théories scientifiques.

²³ Mais il persiste à ne parler de modèles qu'à l'échelle submicroscopique comme Johnstone.

celui des concepts submicroscopiques auxquels il adjoint respectivement un domaine spécifique des représentations des concepts macroscopiques et un autre spécifique des représentations des concepts submicroscopiques. Un troisième domaine de représentations ambiguës (typiquement les formules chimiques, les équations de réaction, qui représentent selon le contexte des concepts macroscopiques ou submicroscopiques) facilite le passage d'un domaine de conceptualisation à l'autre (Taber, 2013)(Figure 17).

Pour Sophie Canac, dont le travail de thèse porte sur l'apprentissage du langage de la chimie, qu'il soit symbolique ou non, la présentation de Taber transforme le domaine symbolique en un méta-niveau (Canac & Kermen, 2016), littéralement un niveau permettant de décrire les autres niveaux de savoir. L'enseignement de ce langage doit se faire en conjonction avec celui des niveaux empirique, macroscopique et microscopique pour deux raisons : au plan psychologique le développement des concepts s'effectue conjointement avec celui de la signification des mots (Vygotski, 1997) et dans l'histoire des sciences le langage, les connaissances empiriques et les modèles se sont développés de façon conjointe (Canac & Kermen, 2016).

Talanquer (2011) a produit une image de l'espace des savoirs en chimie visant à améliorer le triangle de Johnstone en tenant compte des différentes échelles d'appréhension du monde par la chimie, et en distinguant ce qui relève des modèles et des « visualisations » utilisées pour les communiquer. Cette représentation permet d'envisager un niveau de savoir expérimental submicroscopique connecté à des savoirs sur les modèles submicroscopiques et sur les visualisations submicroscopiques (Figure 18).

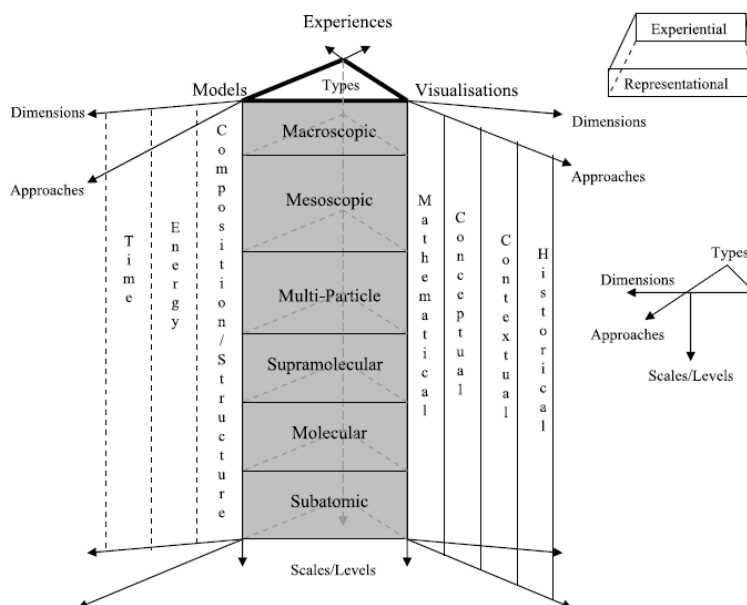


Figure 1. Chemistry knowledge space. The image represents a multi-dimensional space defined by the different scales/levels, dimensions, and approaches in which each of the three main knowledge types (experiences, models, and visualisations) can be conceptualised

Figure 18 : L'espace des savoirs en chimie (Talanquer, 2011)

Comme la brève discussion qui vient d'être proposée le montre, catégoriser les types de savoirs à enseigner pour permettre une meilleure appréhension des concepts et du monde chimiques est une question toujours d'actualité.

Chapitre II Élèves confrontés aux modèles et représentations sémiotiques

Dans la première partie de ce chapitre, je présente des exemples de raisonnements d'élèves que j'ai pu reconstituer lors d'observation de séances de classe et montre en quoi l'approche épistémologique et didactique précédemment explicitée guide leur interprétation. En deuxième partie je mentionne les recherches que j'ai dirigées, portant sur l'appréhension par les élèves de certains systèmes sémiotiques enseignés (ou pas) en chimie dont certains nécessitent des capacités spécifiques de visualisation. Je poursuis avec le projet EVEILS où la visualisation des objets dans un démonstrateur immersif de Réalité Virtuelle ne peut plus ignorer le délai mis par la lumière pour parvenir à l'œil de l'observateur (cette recherche concerne des étudiants). Je termine par des perspectives de recherche sur les raisonnements d'élèves.

II.1. Raisonnements d'élèves à propos d'évolution de systèmes chimiques

Les études réalisées *in situ* dans des classes ordinaires (Kermen, 2015c; Kermen & Barroso, 2013 ; Kermen & Colin, 2017), donc très locales, m'ont conduite à observer quelques élèves et enseignantes, et permettent d'inférer des raisonnements « en train de se faire ». Dans ces articles qui focalisent sur l'activité enseignante, les interventions des élèves n'ont pas toujours été analysées en profondeur. À l'occasion de cette note de synthèse, il m'apparaît intéressant de reprendre et développer ce qui concerne le passage du modèle au niveau expérimental ou inversement et la connaissance du rôle du modèle qu'expriment les élèves.

J'ai pu faire quelques observations de classe durant les deux dernières années d'application de ce programme (2010-11 et 2011-12) portant sur l'introduction du critère d'évolution (Kermen, 2015b) (donc la construction du modèle thermodynamique) et sur l'introduction du thème des piles (Kermen & Barroso, 2013 ;Kermen & Colin, 2017) où le critère d'évolution était mis en application. Je m'appuie sur quelques extraits de séances de classe pour révéler la difficile appropriation de la signification de l'équation de réaction, et montrer la mise en œuvre du concept de transformation chimique.

II.1.1. Signification de l'équation de réaction

Deux séances avec la même enseignante ont été observées lors de deux années consécutives. Les deux extraits issus de ces séances montrent les élèves aux prises avec l'équation de réaction.

Dans la première séance, qui porte sur l'introduction du critère d'évolution, la paire de réactions chimiques inverses est déjà connue des élèves. Dans l'extrait étudié, pour réaliser la tâche de prévision demandée, il est nécessaire que les élèves aient compris la signification de l'équation de réaction. Dans la seconde séance, traitant de l'introduction des piles, le critère d'évolution est connu, il s'agit de l'appliquer. Dans l'extrait proposé, les élèves doivent choisir entre deux équations de réaction fournies. Une équation de réaction écrite avec le signe « = » symbolise une paire de réactions chimiques inverses et signifie *a priori* que deux sens d'évolution du système considéré sont possibles, si toutes les espèces chimiques figurant dans l'équation sont présentes dans le système considéré.

II.1.1.1. Proposer une équation de réaction avant de réaliser une transformation chimique

Dans ce premier exemple où il est demandé à des élèves d'écrire une équation de réaction avant toute pratique expérimentale, les élèves doivent mobiliser des connaissances théoriques. Le modèle acido-basique et la compréhension de la signification d'une équation de réaction, symbole d'une paire de réactions chimiques inverses sont en jeu. L'extrait est issu d'une séance de travaux pratiques en classe de terminale (en mars 2011) où l'objectif de la séance est d'induire le critère d'évolution à partir d'expériences (Kermen, 2015c). Il se situe en tout début de séance. L'enseignante présente aux élèves quatre solutions aqueuses d'acide éthanoïque, d'éthanoate de sodium, d'acide méthanoïque et de méthanoate de sodium, toutes à la même concentration. Elle les nomme, écrit au tableau la formule des différentes espèces ainsi que les volumes des solutions que les élèves auront à prélever pour réaliser ensuite deux mélanges. L'enseignante signale le caractère inhabituel des mélanges envisagés qui « *vont contenir finalement les quatre espèces dont on est en train de parler* ». Avant leur réalisation, elle impose une tâche de réflexion individuelle aux élèves « *proposez moi une équation de réaction sur votre papier* ». L'enseignante s'attend à deux équations de réaction, inverses l'une de l'autre, mettant en jeu un acide d'un couple et la base de l'autre d'un côté de l'équation et les espèces conjuguées de l'autre côté. Les élèves cherchent en silence, puis l'enseignante passe voir ce qu'ils font. Elle discute longuement avec le binôme Chloé et Lucile.

Chloé a écrit « $\text{CH}_3\text{CO}_2\text{H}_{(\text{aq})} + \text{HCO}_2^-_{(\text{aq})} + \text{CH}_3\text{CO}_2^-_{(\text{aq})} + \text{HCO}_2\text{H}_{(\text{aq})} =$ » et ne sait plus comment continuer alors que Lucile a écrit « $\text{CH}_3\text{CO}_2\text{H}_{(\text{aq})} + \text{HCO}_2^-_{(\text{aq})} \rightarrow \text{CH}_3\text{CO}_2^-_{(\text{aq})} + \text{HCO}_2\text{H}_{(\text{aq})}$ ».

L'enseignante engage une conversation avec Lucile pour lui faire réaliser qu'elle n'aurait pas dû mettre une flèche, réservée à des réactions conduisant à des transformations totales. Elle continue pour lui faire comprendre en quoi sa notation était mal adaptée et lui indique que toutes les espèces sont présentes, donc les entités des espèces écrites à droite de la flèche se heurtent aussi et forment les entités des espèces écrites à gauche. Après cette évocation des heurts incessants entre entités, Lucile remplace la flèche par un signe égal (qui symbolise deux flèches en sens opposés). Chloé qui a assisté aux échanges sans rien dire, demande alors : « *ben je ne comprends pas si on mélange toutes les espèces ensemble elles sont toutes en réactifs ?* » Lucile répond que ce n'est pas possible et l'enseignante laisse Chloé réfléchir à ce qui vient d'être dit.

L'erreur de Chloé est inhabituelle, l'enseignante déclare qu'elle ne l'a jamais rencontrée²⁴. En effet elle demande pour la première fois aux élèves d'écrire une équation de réaction susceptible de leur permettre de prévoir ou de représenter une transformation chimique qu'ils vont ensuite

²⁴ Lors d'un bref aparté avec la chercheuse durant la séance de classe et plus tard lors de l'observation de la vidéo de sa séance.

réaliser. Cette erreur est révélatrice. Elle s'inscrit dans la continuité de ce que les élèves ont eu à faire jusqu'ici. Les situations rencontrées par les élèves ne mettaient en jeu que les espèces écrites à gauche dans l'équation de réaction, qui leur était fournie de surcroît. Ou s'ils ont eu à en écrire une, les systèmes considérés comportaient toujours dans l'état initial les espèces qui sont écrites à gauche dans l'équation de réaction. Pour Chloé il est manifeste que le côté gauche de l'équation est compris comme représentant l'état initial du système, les situations rencontrées jusque là n'ont pas permis de lui donner à penser le contraire. Cela indique aussi que les formules et les noms des espèces chimiques sont vides de signification. Les espèces en question sont des acides et des bases, à partir de leur définition elle aurait pu supposer une interaction entre une base et un acide. Pour Chloé un réactif est une espèce qu'on met au début, et faute de recourir au modèle acido-basique de Brønsted, elle ne parvient pas à imaginer de possibles produits. Après avoir écouté le dialogue entre Lucile et l'enseignante et avoir vu une équation de réaction possible écrite par Lucile, elle est désarçonnée par l'idée qu'on puisse avoir mis ensemble des espèces qui pour les unes seront des réactifs et pour les autres des produits. En effet la formulation même de sa question montre que justement elle commence à envisager que le mélange initial ne comporte pas que des réactifs, ce qui constitue vraisemblablement le début de la prise de conscience²⁵.

L'erreur de Lucile est plus courante et d'ailleurs l'enseignante qui avait d'abord entrepris de questionner Chloé s'est assez rapidement tournée vers Lucile avec qui elle a engagé la conversation. Le recours au modèle microscopique cinétique permet à l'enseignante de faire prendre conscience à Lucile qu'elle ne doit pas négliger le caractère réactif des espèces écrites à droite dans l'équation, et que deux réactions inverses sont nécessaires pour interpréter.

L'analyse de ce bref extrait permet de mettre en avant les aspects suivants :

- La seule mention du nom ou de la formule des espèces chimiques mélangées ne permet aucune prévision si les élèves n'associent pas des propriétés à ces espèces. Les propriétés s'interprètent avec un modèle ici en l'occurrence le modèle acido-basique de Brønsted. Les espèces chimiques ayant un statut d'objets-modèles, il ne peut rien être prédit sans les inclure dans un (vrai) modèle c'est-à-dire une articulation de concepts.
- La signification première d'une équation de réaction, dire quelles espèces sont susceptibles de réagir pour former telles autres espèces, ne va pas de soi pour tous les élèves, s'ils n'ont pas eu à le verbaliser une première fois.
- La signification du signe « = » n'est pas encore bien connue.
- Il reste difficile pour des élèves de séparer la situation expérimentale (ici la réalité idéalisée) d'un élément de modèle qui l'interprète. La difficulté est peut-être accentuée du fait qu'on utilise les mêmes symboles (les formules chimiques) pour décrire la situation expérimentale (la composition qualitative du système initial, la réalité idéalisée) et écrire l'équation de réaction.
- Mobiliser le modèle cinétique microscopique permet à l'enseignante dans une certaine mesure de donner du sens à l'écriture symbolique des réactions, pour peu que l'élève mette une certaine distance entre cette représentation et la situation expérimentale.

II.1.1.2. Utiliser une équation de réaction pour appliquer le critère d'évolution

Le second exemple a été enregistré l'année suivante (mars 2012) avec la même enseignante lors de la séance d'introduction au thème des piles électrochimiques (Kermen & Colin, 2017). Les

²⁵ Par la suite ses interventions montrent qu'elle accepte l'écriture de l'équation de réaction proposée par sa voisine et ce qu'elle représente.

élèves doivent choisir une équation de réaction (parmi deux, fournies avec leur constante d'équilibre) pour mettre en œuvre le critère d'évolution, donc mobiliser des connaissances théoriques afin de prévoir une situation expérimentale. Il est demandé aux élèves un travail de réflexion préalable individuel par écrit avant de commencer le TP. Sur la fiche TP figurent une description de mélange à effectuer (lame de zinc, lame de cuivre, solution de sulfate de cuivre, solution de sulfate de zinc), puis la donnée des deux couples oxydant-réducteur correspondant, deux équations de réactions inverses avec leur constante d'équilibre associée, et la consigne suivante « *en exploitant l'une ou l'autre de ces équations, prévoir le sens d'évolution du système* ». Pendant que l'enseignante prépare le dispositif expérimental au bureau, les élèves cherchent. L'enseignante passe voir ce que font les binômes d'élèves et en réponse à une hésitation déclare « *on a déjà traité ce problème* ». Elle fait allusion à la séance d'introduction du critère d'évolution (voir II.1.1.1) où elle a attiré l'attention des élèves sur le fait que le sens d'évolution du système ne dépend pas de la façon dont on écrit l'équation de réaction. À un autre élève, Léo, elle précise la consigne en lui indiquant qu'il doit déterminer l'espèce réduite et l'espèce oxydée, ce qui déclenche la question « *pour chaque équation ?* ». L'enseignante répond : « *ah non non ben pour chaque équation est-ce que c'est nécessaire ? Pour chaque équation tu vas/ ben fais-le tu verras // ce qu'on observe en fait* ». Un peu plus tard, elle envoie Léo au tableau pour corriger, et celui-ci demande alors « *je fais tout ?* » puisqu'il a fait l'exercice avec les deux équations. L'enseignante lui dit de n'en prendre qu'une et lui laisse le choix. Une fois l'exercice corrigé, sans que Léo (ou l'enseignante) n'ait fait de remarque sur ce qu'on aurait obtenu en ayant choisi l'autre équation de réaction, un autre élève, Romain qui n'avait pas pris la même équation que Léo au tableau pose une question similaire à la première interrogation de Léo.

82 Romain : donc pour la première équation les oxydant et réducteur ils changent ou ça reste les mêmes ?

83 Enseignante (s'adressant à tous) : alors si l'équation / si on décide / une autre question avant de travailler / donc si on décide de travailler avec l'autre équation qui vous est proposée est-ce que ça va changer quelque chose à l'expérience ?

84 Élèves : non

85 Enseignante (à tous) : non il s'agit d'une théorie / donc c'est pas parce que tu décides d'écrire l'équation dans un autre sens que d'un seul coup dans le bécher il s'est passé autre chose.

L'enseignante demande ensuite au voisin de Romain, qui a choisi l'autre équation, sa prévision et fait constater à Romain l'accord des deux prévisions en termes d'espèces formées.

La question de Léo exprime son trouble quant à la présence des deux équations et aux résultats différents auxquels elles pourraient conduire. La réponse de l'enseignante s'effectue en deux temps. Elle donne la réponse puis questionne l'élève sur la nécessité de travailler avec les deux équations sans attendre qu'il réponde. Il s'agit pour elle d'argumenter sa propre réponse. Elle s'apprête à lui dire ce qu'il va obtenir en appliquant le critère d'évolution à chaque équation, puis s'interrompt et lui laisse découvrir ce que cela donne. L'interrogation de Léo avant d'aller au tableau, se répète, indice qu'il n'a peut-être pas vérifié la compatibilité des deux approches ou bien simplement révélatrice d'une attente sur ce qu'il doit effectivement faire.

Lorsque Romain manifeste aussi un doute, l'enseignante demande l'avis de la classe en opposant les équations de réaction à l'expérience. Après que la classe affirme l'indépendance de l'expérience vis-à-vis des équations, elle ajoute que le choix d'un élément du modèle (pour rendre compte de l'expérimental) n'a pas d'influence sur le niveau expérimental. Elle reprend la conclusion qu'elle a formulée lors d'une séance antérieure. Mais une argumentation avec appui sur le lien entre écriture de l'équation chimique et prévision issue du calcul du quotient de réaction, n'est pas proposée à toute la classe. Elle a choisi de contextualiser l'explication pour le seul élève qui a exprimé ses doutes.

L'analyse de ce second extrait met en lumière les aspects suivants :

- Avoir à choisir entre deux équations de réaction pour mettre en œuvre le critère d'évolution afin de prévoir une transformation chimique constitue une difficulté pour les élèves. Il est possible que la difficulté soit augmentée parce que les élèves ne sont pas habitués à faire des choix.
- Comprendre que deux sens sont a priori possibles lorsqu'on écrit une équation de réaction ne semble pas être une connaissance opérationnelle pour tous les élèves, alors même que l'enseignante a attiré leur attention sur ce point lors d'une séance antérieure.
- Faire constater que le sens d'évolution prévu dépend de l'équation choisie mais pas le résultat expérimental, s'avère une façon simple de découpler le niveau expérimental du niveau des modèles. Cependant comme elle repose sur la compréhension que les écritures des équations de réaction et des quotients de réaction sont liées (aucune justification de type mathématique n'est esquissée), cela constitue une activité de haut niveau cognitif pour les élèves.

II.1.1.3. Bilan

Que ce soit pour son caractère prédictif, deux sens d'évolution d'un système sont *a priori* possibles, ou pour son rôle définitoire du quotient de réaction, préalable à la mise en œuvre du critère d'évolution, l'équation de réaction constitue une représentation symbolique complexe dont les significations associées ne sont pas toutes mobilisées spontanément par les élèves, ce qui a fait écrire en d'autres temps qu'il s'agissait « *d'un concept intégrateur source de difficultés persistantes* » (Barlet & Plouin, 1994).

II.1.2. Identifier une transformation chimique pour écrire une équation de réaction

Dans l'exemple exposé précédemment (voir II.1.1.2) le critère d'évolution permettait de prévoir, mais il est aussi utilisé pour justifier des observations expérimentales. Alors, les élèves doivent analyser les observations expérimentales pour identifier une transformation chimique et aboutir à l'écriture d'une équation de réaction, préalable à la mise en œuvre ultérieure du critère d'évolution. Des connaissances empiriques et théoriques sont en jeu, typiquement on attend le passage de la réalité perçue à la réalité idéalisée puis au niveau du modèle. La caractérisation de la transformation chimique elle-même (réalité idéalisée) est liée aux observations possibles (réalité perçue), son interprétation s'effectue par l'écriture d'une équation de réaction (modèle).

Deux extraits de séance de classe sont présentés et se situent au début d'une séance de travaux pratiques ayant pour objectif l'étude de piles électrochimiques (Kermen & Colin, 2017). Ils portent sur la réalisation et l'analyse d'une transformation chimique mettant en jeu les espèces chimiques qui constituent la pile Daniell, laquelle intervient dans la suite de la séance.

II.1.2.1. Une identification de la transformation chimique préalable à l'écriture de l'équation de réaction

Dans cet extrait de séance de classe les élèves ont réalisé en autonomie les expériences figurant sur leur fiche de TP, l'extrait analysé concerne la phase de mise en commun lorsque l'enseignante (madame Say²⁶) entreprend de faire écrire l'équation de réaction à partir des observations lors d'un dialogue collectif. Pour saisir les enjeux de ce dialogue, la tâche soumise aux élèves est présentée.

²⁶ Les noms des enseignantes sont des pseudonymes.

II.1.2.1.1. Une tâche expérimentale en deux temps débouchant sur une analyse complexe

La fiche distribuée aux élèves par madame Say comporte deux parties distinctes, expérience, composée de deux courts protocoles, puis analyse. Dans le premier protocole, les élèves doivent introduire une solution de sulfate de cuivre (II) dans un premier tube à essais, puis dans un deuxième tube contenant aussi de la poudre de zinc et agiter. On attend des élèves qu'ils remarquent un dépôt solide sur la poudre de zinc et l'éclaircissement de la solution dans le tube 2 par rapport au tube 1. Dans le deuxième protocole, il s'agit de filtrer le contenu du tube 2, récupérer le filtrat et y ajouter une solution d'hydroxyde de sodium goutte à goutte, puis en excès. On attend la formation d'un précipité blanchâtre (tout dépend s'il reste encore des ions cuivre en solution) et sa disparition. Dans les deux cas, il est demandé de schématiser l'expérience et noter les observations, qui ne sont pas spécifiées.

Dans la partie analyse, les élèves doivent répondre à : « *quelle est la transformation chimique (a) qui a eu lieu dans le tube 2 ?* ». Il faut identifier les espèces chimiques formées et consommées à partir des observations effectuées, mais le raisonnement à conduire n'est pas détaillé. Les élèves doivent prendre en compte les observations des deux expériences successives pour faire un bilan des espèces chimiques formées dans la première expérience. Le dépôt rougeâtre sur la poudre de zinc s'accompagne d'un éclaircissement de la solution, vu en comparant avec le premier tube, signifiant qu'il y a moins d'ions cuivre (II) en solution dans l'état final de la première expérience. Ces deux observations sont interprétées comme la conversion des ions cuivre (II) en métal cuivre.

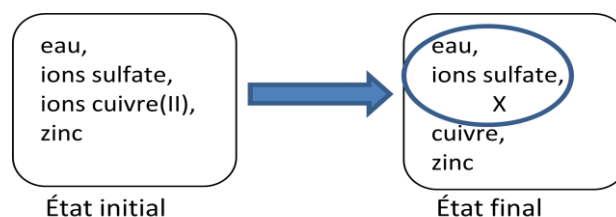


Figure 19 : Description chimique partielle de la première expérience (tube 2)²⁷

La seconde expérience vise à montrer la présence d'ions zinc dans la solution incolore du tube 2 (après filtration, solution entourée en bleu dans la figure 19). En effet les ions zinc (X) forment en présence d'ions hydroxyde un précipité blanc d'hydroxyde de zinc (Y) qui se dissout avec un excès d'ions hydroxyde pour former des ions tétrahydroxozincate (Z) (Figure 20). Comme le montre la figure 20 ci-dessous, les élèves sont confrontés à trois espèces chimiques inconnues, s'ils n'ont jamais rencontré cette expérience.

²⁷ Ce schéma comme le suivant (Figure 20) n'ont pas été proposés par l'enseignante, et font partie de l'analyse *a priori* de la situation.

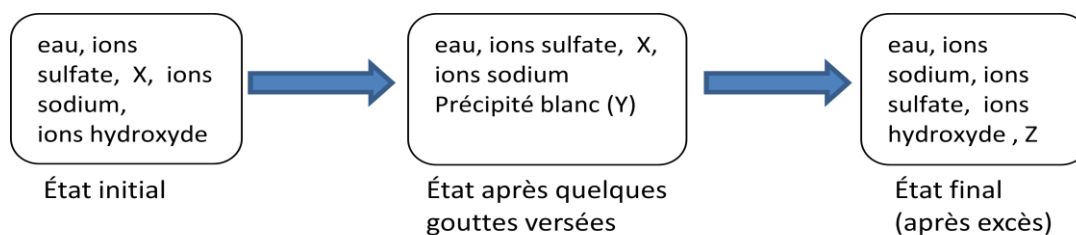


Figure 20 : Description chimique partielle de l'expérience 2

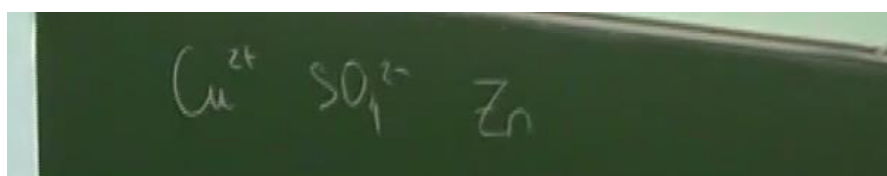
La présence d'ions zinc (dans l'état final de la première expérience) s'interprète alors comme provenant de la modification du métal zinc qui a réagi avec les ions cuivre (II) pour donner des ions zinc et du métal cuivre. Les espèces présentes (dans l'état final de la première expérience) ne sont pas les mêmes qu'au début, il y a bien eu une transformation chimique (a) dont il est question dans l'énoncé. Les élèves ont à fournir une description chimique conduisant à identifier une transformation chimique parce que de nouvelles espèces chimiques ont été formées. Il n'est pas demandé d'écrire l'équation de réaction correspondante à ce stade.

Le raisonnement à fournir est classique en chimie, prendre appui sur une deuxième transformation chimique pour identifier une espèce chimique ayant pris part à une première expérience. Cependant, sans indication il peut être complexe car il nécessite de bien recenser les espèces qui participent à chaque transformation.

II.1.2.1.2. *Mise en commun des observations pour parvenir à l'écriture de l'équation de réaction*

Lors de la réalisation des expériences par les élèves, l'enseignante a modifié la consigne, pour répondre à la question, il faut aussi écrire l'équation de réaction. La mise en commun débute par une description précise des observations effectuée par Carla interrogée par madame Say « *et on observe que hm qu'il y a un dépôt gris au fond du tube, c'est le dépôt de la poudre et enfin que c'est surmonté d'une solution transparente donc la couleur bleue a disparu et voilà* ». Puis madame Say s'enquiert si la poudre (de zinc) a changé d'aspect, Carla répond par la négative, et l'enseignante déclare « *ben il semble que non okay heu qu'est-ce qu'on fait ensuite? Deuxième partie ?* ». Carla poursuit et répond aux demandes de précision concernant le résultat de la deuxième expérience, lorsque madame Say demande à quoi sert cette deuxième expérience, l'ajout de soude (solution d'hydroxyde de sodium) dans le filtrat, silence de Carla.

Madame Say fait appel aux autres élèves et à leurs souvenirs de l'année antérieure, sans succès, bien qu'elle leur dise qu'ils ont « *réalisé plusieurs tests d'identification d'ions* ». Elle donne une indication sur le rôle de la deuxième expérience « *ce test là il est simplement dans l'expérience pour vous indiquer quel type d'ions peut se trouver en présence dans la solution* ». Devant leur absence de souvenir elle déclare : « *alors sans s'en souvenir on peut réfléchir qu'est-ce qu'il y avait dans le tube au départ dans l'état initial ?* » (239). Elle leur fait recenser les espèces présentes initialement et les inscrit au tableau.



244 Enseignante : du zinc. Alors qu'est-ce que vous savez de manière générale en chimie ?

245 Louise : que rien ne se perd....

246 Carla : ça se conserve

Élèves face aux modèles et représentations sémiotiques

247 Enseignante : voilà rien ne se perd rien ne se crée

248 Élèves (*en cœur avec l'enseignante*) : tout se transforme de monsieur Lavoisier

249 Enseignante : tout se transforme de monsieur Lavoisier. Donc ça signifie qu'il y a conservation des éléments donc si j'ai du zinc dans l'état initial j'ai du zinc dans l'état final. Il sera peut-être sous une forme différente il sera peut-être pas sous forme d'atome mais y aura du zinc. J'aurai l'élément cuivre et j'aurai les éléments soufre et oxygène donc à partir de ça vous savez qu'il se passe quelque chose il y a réaction puisque vous avez eu un changement de coloration de votre solution (...)

Elle s'appuie alors sur l'observation effectuée de la décoloration pour amener les élèves à valider la modification des ions cuivre mais sans conclure à la formation de cuivre solide (249). Puis après une pause de quelques secondes elle revient sur la présence d'ions dans la solution pour obtenir des élèves la réponse attendue, les ions zinc (256) et enchaîne sur les ions sulfate.

255 Enseignante : (...) quels sont les ions qui pourraient se former à partir de tout ça qui sont incolores en solution mais qui forment un précipité blanc avec la soude ?

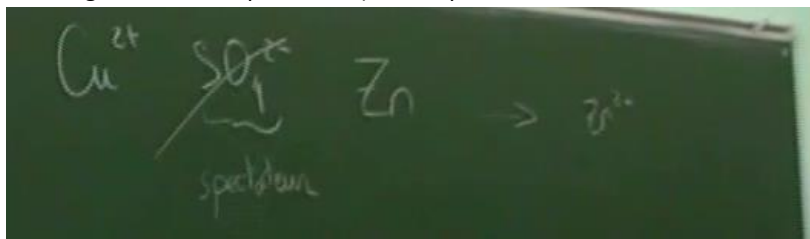
256 Élèves (plusieurs) : Zn deux plus

257 Enseignante : ben oui le plus logique ce serait de dire que ce sont des Zn deux plus (*écrit la formule au tableau*) parce que SO₄ deux moins qu'est-ce qu'il a de particulier dans ce mélange là ?

258 Élodie : spectateur

259 Élève : spectateur

260 Enseignante : il est spectateur (*écrit « spectateur » au tableau et barre la formule*).



Donc celui-là on va l'oublier puisque il va être spectateur. Donc initialement vous avez des ions CU deux plus en solution, du zinc, va se former... ce test à la soude vous indique clairement la présence du ZN deux plus et même si vous oubliez ce test rien qu'en réfléchissant vous pouvez le trouver. C'est l'ion zinc qui forme ce précipité blanc. Et qu'est-ce qui va donc se former ? (*écrit le signe + à côté de la formule de l'ion zinc*)

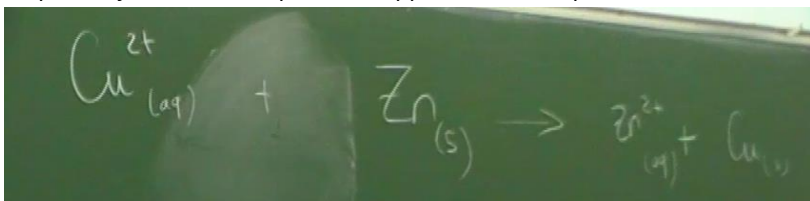
261 E : Cu

262 E : Cu (3s)

263 Enseignante : alors forcément ça contient du cuivre

264 E : (inaudible)

265 Enseignante : et effectivement c'est du cuivre solide alors parfois dans certains tubes mais c'est pas toujours le cas on peut voir apparaître une espèce de coloration un petit peu rouge (...)



L'enseignante, madame Say, passe un temps important à préciser les observations pour établir la transformation chimique et ensuite écrire l'équation de réaction. L'écriture en elle-même est assez rapide, puisqu'elle est une conséquence de tout le travail préalable fait au tableau, qui

s'avère un lieu d'écrits intermédiaires, donc un outil de travail et pas seulement un lieu d'écrits définitifs.

II.1.2.1.3. Analyse du dialogue collectif

L'objectif étant de déterminer comment le passage de la réalité perçue à la réalité idéalisée, puis le passage au niveau du modèle s'effectuent, deux aspects sont plus particulièrement analysés : l'adaptation réalisée par madame Say pour pallier l'insuffisance des observations, le passage de la description de la transformation chimique à l'écriture de l'équation de réaction.

Dès le recueil des observations de Carla, madame Say introduit un léger doute dans sa validation en disant « *il semble qu'* » il n'y a pas de changement d'aspect de la poudre²⁸. Elle ne va donc pas pouvoir faire caractériser la formation de cuivre par la vue. Puis elle entreprend de faire dire aux élèves sans succès à quoi sert le test d'identification d'ions. Ces deux indéterminations la conduisent à changer de stratégie et à les faire « réfléchir » (239). La réflexion s'accompagne d'un recours à l'écriture, alors que jusque là, tout s'est déroulé oralement. Le recensement des espèces initialement présentes n'est pas complet, puisque l'eau est omise. Madame Say conduit les élèves à invoquer un principe de la chimie, la conservation des éléments chimiques. Ce choix est dicté par les réactions des élèves et s'appuie sur des habitudes de la classe comme en atteste la réponse des élèves (248) alors que madame Say elle-même juge sa question très vague dans la confrontation à sa vidéo de classe.

Jusqu'au tour de parole 257, l'écrit proposé pouvait tenir lieu de représentation de la transformation chimique en cours d'identification (voir figure 19). L'enseignante a bien précisé qu'elle s'intéresse à l'état initial et à l'état final du système (249). À ce moment-là (257) madame Say interroge les élèves sur la particularité des ions sulfate. La réponse des élèves est immédiate « *spectateur*²⁹ » (258, 259) ce qui indique qu'il s'agit là aussi d'une connaissance liée à une habitude de classe. Au tour de parole 260, au lieu de réécrire la formule des ions sulfate de l'autre côté de la flèche, ce qui aurait alors signifié que cet autre côté représentait encore l'état final du système chimique, madame Say barre le symbole des ions sulfate. Cette décision indique qu'elle réoriente l'écrit vers l'écriture de l'équation de réaction qui, elle, ne comporte que les réactifs et les produits de la transformation chimique. L'ajout du signe « + » juste après confirme ce changement, sans qu'elle le mentionne. La représentation schématique de la transformation chimique a été abandonnée avant d'être complète. La mise à l'écart des ions sulfate correspond à une sélection de certaines données et est caractéristique d'un acte de modélisation.

Puis dans le même tour de parole (260), madame Say passe sans transition de considérations sur l'élément zinc au niveau expérimental (elle dit le rôle du test) à son autre objectif, déterminer la nature de l'autre produit de la transformation chimique, le cuivre, en posant une nouvelle question et les élèves répondent immédiatement (261,262). Le dialogue se situe au niveau de la réalité idéalisée et de la réalité perçue (quand elle parle de la couleur qu'ils auraient dû voir) alors que la trace écrite se situe elle au niveau du modèle. La suite du dialogue montre qu'un élève s'interroge sur la conservation des charges électriques, preuve de leur attention et d'une centration sur l'écriture de l'équation, l'abandon de la caractérisation complète de la transformation chimique ne les a pas troublés.

²⁸ Selon son état de division et l'épaisseur de la couche formée, un dépôt de cuivre peut ne pas apparaître rougeâtre mais noirâtre, ce qui explique que l'élève n'ait pas noté de changement.

²⁹ Il s'agit d'une dénomination usuelle pour indiquer qu'une espèce chimique ne prend pas part à une transformation.

II.1.2.1.4. *La question des transformations chimiques successives*

Une fois l'équation de réaction écrite, madame Say interroge les élèves sur la nature de la réaction. La réponse fuse immédiatement, « *précipitation* », de la part de plusieurs élèves. Elle les détrompe en déclarant qu'elle ne parle pas de l'expérience avec la soude.

Cette réponse incorrecte proposée par les élèves fait écho à la difficulté éprouvée par Carla, qui n'avait pas su dire à quoi servait la formation du précipité. Cette réponse est un indice d'une confusion entre les deux transformations chimiques étudiées ou tout au moins d'une distinction insuffisante. Les élèves ne semblent pas avoir pleinement conscience qu'il s'agit effectivement de deux transformations chimiques successives, une par expérience réalisée.

L'enseignante sans doute orientée par son objectif, parvenir à l'écriture de l'équation de réaction d'oxydoréduction, ne décompose pas la deuxième transformation chimique en état initial et état final du système, et n'en écrit pas l'équation de réaction correspondante. Cette transformation chimique est secondaire, elle joue un rôle d'auxiliaire pour déterminer l'une des espèces produites dans la première transformation chimique. D'ailleurs elle porte un nom particulier, « test d'identification ». Du coup, ayant cette fonction unique d'identifier une espèce chimique ionique (fonction rappelée par madame Say), il ne semble pas nécessaire aux yeux de l'enseignante de la traiter comme une transformation chimique classique, objet d'étude, pour laquelle elle s'attache à déterminer les espèces présentes dans l'état initial puis celles apparaissant dans l'état final du système. Il est possible que cette différence de traitement dans la prise en compte des deux transformations, ajoutée à la différence d'appellation ne permette pas à certains élèves de saisir qu'il s'agit effectivement de deux transformations chimiques différentes.

II.1.2.2. *Des observations à l'écriture de l'équation de réaction sans mention de transformation chimique*

Dans cette séance, les élèves ont assisté à l'expérience faite au bureau et l'enseignante (madame Branly) les sollicite brièvement lors d'un dialogue collectif pour écrire l'équation de réaction suite aux observations.

La fiche de madame Branly comporte une expérience mettant en jeu initialement les quatre espèces chimiques réactives (lame de zinc, cuivre, ions cuivre (II), ions zinc). Observer des modifications du milieu réactionnel est difficile dans le cas des quatre espèces initialement présentes puisque les processus sont lents et qu'il s'agit de voir un affaiblissement de la teinte de la solution et un dépôt sur une lame de zinc au travers de la solution colorée, donc pas très visible. Les élèves doivent traduire les observations (couleur et dépôt) en termes d'espèces chimiques, formation de cuivre et consommation d'ions cuivre, pour identifier en partie la transformation chimique (un réactif et un produit) et ensuite passer à l'interprétation en termes de réaction chimique et à son écriture symbolique. La donnée des couples oxydant-réducteur oriente les élèves et leur indique qu'il faut prendre en compte le couple de l'élément zinc, alors que rien dans les observations ne permet de le voir. Il s'agit d'un réinvestissement d'une connaissance antérieure, l'écriture d'une équation de réaction d'oxydoréduction, les deux couples ayant été fournis.

Les observations sont difficiles, trop peu de temps s'étant écoulé entre la réalisation de l'expérience et la demande d'observation, ce qui conduit l'enseignante à demander aux élèves de les prévoir. Un bref dialogue s'ensuit :

78 élève : ça sera plus bleu non ?

79 enseignante : alors oui la coloration bleue qu'est-ce qu'elle va faire ?

80 élève : elle va disparaître

81 enseignante : voilà c'est très bien on va observer une décoloration donc on observe /une décoloration de la solution (...)

Elle montre ensuite la lame de zinc à quelques élèves et l'un d'eux suggère « *y aura pas un dépôt de cuivre aussi ?* » sans le décrire. L'écriture de l'équation chimique qui suit est très rapide, une élève dictant à l'enseignante sans faire référence aux observations.

Le passage de l'observation (peu concluante) à la prévision se traduit par l'usage du futur par l'enseignante et les élèves. Aucun indice ne permet de savoir ce qui motive la réponse de l'élève (78), devinette ou réminiscence d'une expérience déjà évoquée à plusieurs reprises dans des exercices antérieurs. Le ton interrogateur montre cependant que l'élève fait une tentative, que l'enseignante fait confirmer (80), puis approuve et transforme en observation en usant du présent, alors qu'aucun mélange témoin n'est présenté à l'appui. Ensuite, le fait de montrer aux élèves la lame de zinc, les incite à rechercher une modification à la surface, l'un d'eux propose un dépôt de cuivre dont il ne décrit rien. Le dépôt est-il réellement visible (pas sur la vidéo) ou bien l'élève a-t-il utilisé un raisonnement fondé sur les couples oxydant-réducteur ?

Les difficultés rencontrées contribuent à rendre les observations secondaires. L'absence d'observation relative aux ions zinc ne semble pas gêner l'enseignante pour qui la mention du léger dépôt de cuivre suffit à constituer l'indice déclencheur du sens d'écriture de l'équation de réaction d'oxydoréduction, exercice auquel les élèves sont rompus a-t-elle spontanément dit en entretien. La description complète des réactifs et des produits à partir de la situation expérimentale, donc le passage de la réalité perçue à la réalité idéalisée, est tronqué, l'identification de la transformation chimique est omise. L'écriture de l'équation de réaction d'oxydoréduction provient d'un savoir-faire travaillé en début d'année à partir de la donnée des couples oxydant-réducteur et relève exclusivement du niveau du modèle.

II.1.2.3. Conclusion

Les exemples présentés ne permettent qu'un accès partiel aux raisonnements des élèves mais sont révélateurs. L'exemple de madame Say (II.1.2.1) montre que l'observation est entièrement guidée par des connaissances qui sont explicitées, pour la plupart, par l'enseignante. Le passage de la réalité perçue à la réalité idéalisée ne s'effectue que partiellement à partir des indices expérimentaux et des connaissances associées (mobilisation de la solution de couleur bleu clair indicatrice de la présence d'ions cuivre (II), mais pas de solide rougeâtre associé au cuivre ni précipité blanc soluble associé à la présence d'ions zinc) parce que les indices ne sont pas suffisamment nets ou les connaissances sont absentes. La phénoménographie (Martinand, 1992) est insuffisante pour établir l'état des lieux attendu.

L'enseignante recourt à la conservation des éléments chimiques pour compléter les observations. Ce principe de la chimie et les règles d'écriture des espèces chimiques font partie du paradigme explicatif de la chimie ou de la matrice cognitive (Martinand, 1998) à l'aide de laquelle les observations prennent sens. Mais une connaissance moins générale que le principe de conservation des éléments chimiques, la non réactivité des ions sulfate joue un rôle tout aussi important, et a été rappelée sous la forme d'un terme codé habituel en chimie, espèce spectatrice. De même l'enseignante n'a pas relevé l'omission des élèves dans l'état des lieux initial du système, l'eau, il s'agit d'un implicite partagé par la classe et l'enseignante. Peut-on y voir la manifestation du style de pensée commun à la classe et l'enseignante dont Sensevy et Santini (2006) disent qu'il constitue « une disposition à voir de manière dirigée » les phénomènes étudiés dans la classe ?

Malgré les difficultés des observations et la composition initiale du système, rien ne s'opposait à ce que madame Branly fasse un état des lieux détaillé du système final comme madame Say, quitte à s'appuyer sur la conservation des éléments chimiques comme elle, pour pallier l'absence de caractérisation des ions zinc. Le choix fait par madame Branly de s'appuyer sur un savoir-faire théorique montre qu'alors le concept de transformation chimique n'est pas utilisé. Ces deux exemples très contrastés, identification quasi complète d'une transformation chimique et absence de mention, sont un témoignage de positions quasi opposées quant à la prise en compte d'observations non conformes à l'attente, situation relativement fréquente en classe de chimie.

II.1.3. Apport des observations de classe à la connaissance des raisonnements d'élèves sur l'évolution des systèmes chimiques

Les difficultés de mise en œuvre du critère d'évolution lui-même, m'étaient connues à la suite des enquêtes faites dans ma thèse et les observations de classe ont confirmé celles relatives à l'écriture du quotient de réaction (voir Kermen & Colin, 2017). L'autre apport de ces observations de classe quant à la connaissance des raisonnements et difficultés des élèves concerne ce qui a trait à l'équation de réaction, ses significations et le lien avec une transformation chimique en contexte expérimental.

En analysant comment les enseignants et les élèves utilisent la situation expérimentale pour parvenir à l'équation de réaction, il apparaît qu'effectivement les élèves mobilisent des connaissances antérieures (espèces chimiques, symboles) au fonctionnement du modèle actuel (le modèle thermodynamique) et qu'elles ne sont pas toutes de même portée. Ce qui relève de la phénoménographie est local, et ne peut être transféré à une autre situation quelconque, par contre le principe de conservation des éléments chimiques est omniprésent et sous-tend tout raisonnement concernant les transformations chimiques. Ce même principe permet d'affirmer que lorsqu'on demande une modélisation aux élèves (une réaction chimique) à partir d'une situation expérimentale donnée, ceux-ci ne peuvent effectuer qu'une modélisation dans ce cadre-là, sous contrainte pourrait-on dire. Ils ne peuvent faire intervenir un élément chimique qui ne serait pas présent initialement. De même il ne leur vient pas à l'esprit d'utiliser des symboles autres que ceux des chimistes. L'apprentissage de ces symboles et des noms³⁰ qui vont avec, constitue une nécessité pour que les élèves entrent dans le monde de la chimie, dans un collectif de pensée (Sensevy & Santini, 2006). La matrice cognitive (Martinand, 1998) de la chimie comporte au minimum le langage de la chimie et le paradigme explicatif que constitue le principe de conservation des éléments chimiques.

Avant d'effectuer des observations de classe, le rôle de cette matrice cognitive me paraissait un peu nébuleux et je ne voyais pas comment elle pouvait être invoquée pratiquement dans le contexte de la classe. L'observation des acteurs en situation m'a permis une prise de conscience, m'a ouvert les yeux en quelque sorte.

II.2. Systèmes sémiotiques enseignés en chimie : des difficultés très spécifiques

Venant de souligner l'importance de l'utilisation du langage de la chimie comme mode de communication spécifique de la chimie, j'aborde maintenant les recherches auxquelles j'ai contribué concernant la compréhension qu'ont les élèves de certaines des représentations qui leur sont proposées, et qui appartiennent aux systèmes sémiotiques variés utilisés en chimie.

³⁰ La recherche de Sophie Canac montre que cela ne se fait pas sans difficultés (Canac & Kermen, 2016)

Selon Duval (1993) un système sémiotique est constitué de signes (représentations sémiotiques) obéissant à des règles de construction et de fonctionnement. Si un système sémiotique remplit les trois fonctions cognitives de formation, traitement et conversion (dans un autre système sémiotique) d'une représentation alors il constitue un registre de représentation. L'utilisation congruente de différents systèmes sémiotiques pour un même objet permet la conceptualisation de l'objet.

La première recherche (avec Sophie Canac) concerne la maîtrise du langage élémentaire de la chimie (formules et noms) par des élèves et mêle des systèmes sémiotiques de nature différente, un langage spécialisé, la langue ordinaire modifiée selon Jacob (2001), et le langage symbolique spécifique de la chimie. Dans cette recherche, il est question des noms des espèces chimiques et des molécules (le langage spécialisé) et des formules moléculaires, qui sont des associations de lettres et de chiffres (si l'on regarde cela d'un point de vue tout à fait extérieur), ainsi que des équations de réaction qui constituent des associations très codifiées de formules moléculaires, de signes plus et de flèches. Formules moléculaires et équations de réaction font partie du langage symbolique de la chimie. La seconde recherche (avec Destin Mangane) porte sur la compréhension d'un langage symbolique particulier, celui des représentations utilisées en stéréochimie, les représentations de Cram et de Newman des molécules organiques. Au contraire du langage symbolique évoqué dans la première recherche qui concerne à la fois des concepts macroscopiques et microscopiques, celui-ci ne porte que sur des concepts microscopiques.

II.2.1. Appropriation du langage élémentaire de la chimie

Dans son travail de thèse, que je dirige, Sophie Canac a effectué un état des lieux de la maîtrise qu'ont les élèves à propos de notions élémentaires du langage de la chimie. Par langage de la chimie il faut entendre langage symbolique (formules chimiques, équations de réaction) et langage spécialisé (les noms entre autres). L'hypothèse d'une insuffisante maîtrise, à valider, lui permettra ensuite de proposer des outils didactiques visant à travailler spécifiquement sur les noms scientifiques des espèces chimiques et la constitution des formules chimiques. Je présente les lignes de force des résultats de son enquête qui figurent dans un article (Canac & Kermen, 2016) paru dans un numéro spécial de la revue *Chemistry Education Research and Practice* consacré au langage et à l'enseignement-apprentissage de la chimie (Markic & Childs, 2016).

Une étude historique du développement du langage de la chimie, et un recensement des difficultés constatées par des recherches antérieures montrent que l'apprentissage du langage de la chimie doit faire l'objet d'un enseignement explicite. Une brève analyse du programme (collège et lycée) et des manuels scolaires du collège montre que cet enseignement n'est pas pris en charge actuellement. L'hypothèse a donc été faite que les élèves éprouveraient de réelles difficultés à maîtriser le langage de la chimie.

L'enquête a été réalisée auprès de 558 élèves (de la quatrième à la terminale) au moyen d'un questionnaire comportant cinq questions à choix multiples pour certaines, à choix unique pour d'autres avec justification et une à réponse ouverte.

Pour tester la compréhension des élèves, trois types de questions ont été posés : le premier porte sur le critère qu'ils donnent pour classer (sans consigne supplémentaire) une liste de noms usuels et de noms scientifiques. Le second type vise à déterminer quelles caractéristiques, macroscopique et/ou microscopique, parmi quatre proposées (corps pur, mélange, atome, molécule) ils associent à des formules et des noms. Le troisième type examine s'ils sont capables d'utiliser le concept de molécule en tant que combinaison d'un nombre fixé d'atomes, hors et dans le contexte d'une équation de réaction.

Concernant le critère utilisé par les élèves pour classer des noms, très peu (moins de 6%) se fondent sur la distinction entre mélange et corps pur, le critère le plus fréquent est l'opposition macroscopique-microscopique (24%) où, alors, les noms scientifiques sont associés exclusivement au niveau microscopique. L'opposition entre noms courants et noms scientifiques ne semble pas signifiante pour les élèves et ne leur permet pas de classer les noms fournis en mélange et corps purs.

Un tiers seulement des élèves interrogés associe un critère macroscopique (corps pur ou mélange) et un critère microscopique (atome ou molécule) à un nom ou une formule, de plus ceux qui répondent correctement pour les critères microscopiques ne sont pas les mêmes que ceux qui répondent correctement pour les critères macroscopiques. Les élèves choisissent principalement des critères microscopiques pour les formules et les noms (qui leur semblent scientifiques), et cette vision microscopique augmente avec le nombre d'années d'étude (plus répandue en première et terminale qu'au collège). Pour les formules, ce résultat peut s'expliquer parce que celles-ci sont introduites avec les concepts d'atome et de molécule dans le programme de quatrième. Par contre, cela reste surprenant pour les noms. Bien que le concept de corps pur soit introduit dès la cinquième, aucun travail autour de la nomenclature n'accompagne la dénomination des substances. Ces résultats indiquent que le langage de la chimie ne facilite pas les déplacements entre les niveaux conceptuels macroscopique et microscopique.

Les réponses correctes pour les critères microscopiques augmentent avec le nombre d'années d'étude au contraire des réponses correctes pour les critères macroscopiques dont la proportion stagne ; de plus les réponses incorrectes pour les critères macroscopiques révèlent une confusion entre corps pur et corps simple. La syntaxe du nom (lorsqu'il véhicule des informations comme dans dioxygène ou dioxyde de carbone) facilite le choix entre atome et molécule mais constitue une source d'erreur pour le choix entre mélange et corps pur, ce qui constitue un résultat nouveau par rapport aux études antérieures.

Le concept de molécule en tant que combinaison d'un nombre fixé d'atome n'est pas opératoire. Hors contexte d'une équation de réaction, moins de 40% des élèves interrogés (seulement 50% en première et terminale) sont capables de dire que deux formules proposées ne correspondent pas à la même molécule et ce dans le cas des trois paires fournies (H_2O et H_2O_2 , O et O_2 , CH_4 et C_2H_6). Dans le contexte d'une équation de réaction, moins de 10% des élèves interrogés parviennent à dire explicitement que O n'est pas le dioxygène et H_4O_2 n'est pas l'eau (à chaque fois deux équations de réaction étaient proposées : l'une avec O , respectivement H_4O_2 , et l'autre O_2 , respectivement H_2O), ce qui confirme de précédentes études.

L'hypothèse d'une absence de maîtrise du langage élémentaire de la chimie est confirmée et les résultats montrent que l'enseignement de ce langage n'est pas une priorité. Les résultats ne permettent pas de trancher entre deux possibilités : le langage de la chimie source d'une mauvaise compréhension du concept de corps pur ou au contraire une mauvaise compréhension de ce concept qui guiderait les élèves vers une appréhension partielle du langage et favoriserait une vision microscopique. Il paraît donc utile et nécessaire de proposer une progression liant le langage et les niveaux de conceptualisation macroscopique et microscopique incluant un travail sur les modèles, de façon conjointe, dès le collège. En d'autres termes, les savoirs portant sur les systèmes sémiotiques doivent faire l'objet d'un enseignement spécifique, *en même temps* que les savoirs portant sur les autres aspects, niveau expérimental et niveau des modèles.

Les résultats de cette recherche montrent notamment des difficultés à associer à un signifiant (formule ou nom) des signifiés différents (concept macroscopique ou concept microscopique) qui réfèrent donc à des objets différents. Dans la recherche suivante, l'une des difficultés majeures consiste à décrypter le signifiant lui-même (la formule de Cram ou Newman) pour reconstituer l'objet représenté (la molécule dans l'espace).

II.2.2. Les représentations sémiotiques en stéréochimie

L'enseignement de la stéréochimie, étude de l'arrangement spatial des entités atomico-moléculaires, est particulièrement développé dès les premiers cours de chimie organique. Les chimistes ont créé des systèmes sémiotiques dédiés permettant de mettre en valeur tel ou tel aspect de la structure spatiale d'une molécule. Une représentation de Newman permet de mieux mettre en valeur les rotations de groupe d'atomes autour d'un axe internucléaire, de distinguer des conformations éclipsées ou décalées, une représentation de Cram la disposition dans l'espace des différents groupes d'atomes etc. Ces représentations sémiotiques ont en commun d'être des représentations de molécules reposant sur un modèle, le même modèle structural dit de la théorie des orbitales moléculaires³¹ qui permet notamment d'expliquer la possibilité de rotation d'un groupe d'atomes autour de l'axe d'une liaison σ , de justifier au contraire l'absence de rotation autour de l'axe d'une liaison π , et la valence des différents éléments chimiques présents dans les molécules organiques. Ces propriétés sous-tendent la structure et la manipulation de ces représentations sémiotiques.

L'enseignement de la chimie organique (et les chercheurs aussi) use abondamment de représentations sémiotiques sur papier, donc de représentations en deux dimensions des molécules, objets tridimensionnels inaccessibles à la perception commune. Un parallèle peut être fait avec le cas des mathématiques dont les objets (abstraites tels que les nombres) ne sont accessibles que par l'intermédiaire de représentations sémiotiques variées et dont les enseignants selon Duval (1993) ne mesurent pas la difficulté qu'ont les élèves à coordonner les informations apportées par les différents systèmes sémiotiques alors que c'est une condition nécessaire à la conceptualisation. Destin Mangane dans sa thèse que j'ai dirigée, a étudié l'appropriation par des élèves des différentes représentations sémiotiques figurant au programme de la classe de terminale D au Bénin. Les lignes qui suivent résument un article qui s'attache à caractériser sous l'angle de la visualisation mentale, les raisonnements menés et les difficultés rencontrées par les élèves lorsqu'ils doivent faire une rotation autour d'un axe internucléaire d'une représentation de Cram fournie, puis des conversions entre représentations de Cram et de Newman (Mangane & Kermen, 2016).

Il est difficile pour des débutants d'accéder aux informations spatiales que renferment les représentations sémiotiques en deux dimensions, faute de capacités de visualisation suffisantes. S'agissant de molécules organiques il est essentiel de connaître la géométrie d'un tétraèdre, les codes du système de représentation adopté et certaines règles chimiques, par exemple le nombre de liaisons établies par un atome de carbone (sa valence). Ainsi, il apparaît que lors de l'utilisation de représentations sémiotiques de molécules sont mobilisés de façon concomitante plusieurs champs conceptuels, la géométrie, la sémiologie et la chimie en adaptant les propos de Vérillon (1996) portant sur le dessin technique. Les productions des élèves sont considérées comme étant l'expression d'une représentation (mentale) interne qu'il s'agit de reconstituer pour caractériser les raisonnements des élèves.

Résoudre une question de stéréochimie à partir d'une représentation sémiotique plane peut donner lieu à une variété de stratégies allant de raisonnements purement analytiques à des raisonnements uniquement spatiaux (Stieff & Raje, 2010). Un raisonnement analytique met en œuvre l'application d'un ensemble de règles en remplacement de transformations spatiales complexes, sans recourir à des images mentales (Stieff, Hegarty, & Dixon, 2010). Un raisonnement spatial recourt à la manipulation d'images mentales et met en jeu une ou plusieurs

³¹ On peut aussi s'appuyer sur la théorie de la liaison de valence (Hiberty & Volatron, 2003)

dimensions de la capacité de visualisation mentale dont les dimensions majeures sont (d'après Lohman, 1979 cité par Harle & Towns, 2011):

- la visualisation spatiale, capacité à appréhender la structure tridimensionnelle des molécules à partir d'une représentation sémiotique plane;
- l'orientation spatiale, capacité à imaginer comment une représentation sémiotique de la molécule serait vue dans une perspective différente;
- les relations spatiales comme la capacité à effectuer une rotation mentale d'un objet dans un plan ou dans l'espace, ou toute autre capacité de manipulation mentale.

La première question posée aux élèves, teste l'activité de traitement dans le registre de Cram, qui peut se résoudre à l'aide de la capacité de rotation mentale. Il est demandé de dessiner la représentation de Cram correspondant à une rotation de 60° des substituants du carbone de gauche autour de l'axe internucléaire C—C (Figure 21).

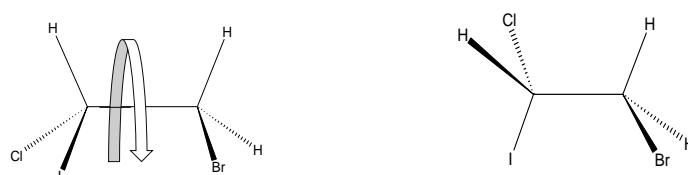
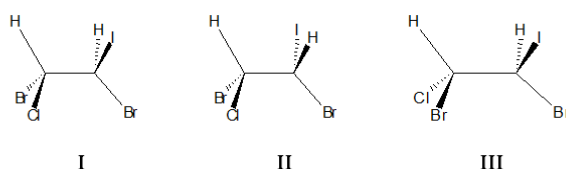


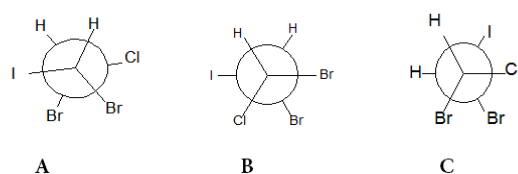
Figure 21 : schéma proposé aux élèves à la question 1 et réponse attendue

La question 2 teste l'activité de conversion entre systèmes sémiotiques. Trois stéréoisomères en représentation de Cram et trois en représentation de Newman sont présentés. Il est demandé de choisir la position de l'observateur parmi une série de trois propositions [à gauche de la représentation de Cram (a), à droite de la représentation (b), ni à gauche et ni à droite(c)] afin d'obtenir chaque représentation de Newman à partir d'une des représentations de Cram fournies (Figure 22).

Représentations de Cram



Représentations de Newman



| représentations de Newman \ représentations de Cram | A | B | C |
|---|---|---|---|
| I | c | c | a |
| II | c | c | c |
| III | b | c | c |

Figure 22 : représentations proposées à la question 2 et réponses attendues : la représentation de Newman considérée correspond à (a) la représentation de Cram observée par la gauche, (b) par la droite, (c) à aucune position de l'observateur.

Le détail des réponses est consultable dans (Mangane & Kermen, 2016). Les principaux résultats sont les suivants.

Les élèves ont du mal à réaliser l'opération de rotation des substituants autour de l'axe C—C puisqu'aucune réponse correcte n'a été fournie (N=340). Les difficultés géométriques des élèves sont importantes, la majorité des élèves propose une réponse où l'angle de rotation, angle dièdre, vaut 120° au lieu de 60° . Certaines difficultés des élèves ont une dimension sémiologique : le code de représentation n'est pas respecté lorsque tous les traits de liaison sont dessinés en tirets simples (14%) ou lorsque les angles sont erronés (74%), ce qui peut refléter un manque d'habitude à dessiner de telles représentations ou une prise de conscience insuffisante que ces représentations sont codifiées. Le cas où les élèves dessinent une conformation décalée avec des traits de liaison gras et hachuré mal disposés (Figure 23), erreur également repérée chez des étudiants (Pellegrin, Sivade & Barlet, 2003), suggère qu'ils n'associent pas d'image mentale à la représentation plane ou seulement une image partielle (localisée à une partie de la représentation) et ne peuvent donc pas se rendre compte de l'impossibilité du point de vue de l'observateur qu'ils dessinent.

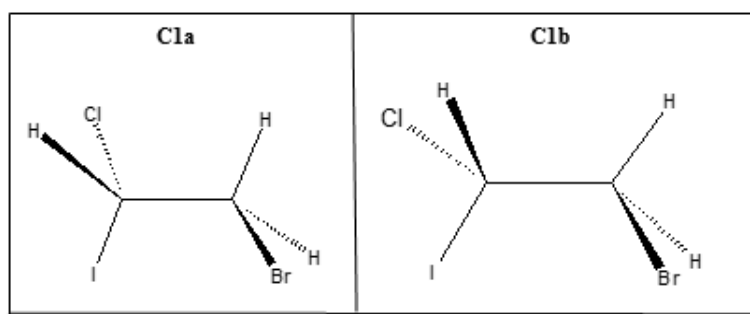


Figure 23 : C1a représentation correcte pour un observateur regardant l'objet par-dessus et en étant décalé vers la droite par rapport au plan horizontal contenant le segment C-C et par rapport au milieu du segment C-C ; C1b, représentation incorrecte.

À la question relative à la conversion inter registres Cram-Newman (question 2), aucun élève ne donne toutes les réponses attendues. La compréhension de la consigne et la longueur de la tâche peuvent être incriminées. L'analyse des réponses proposées par certains élèves nous permet de supposer que les capacités de visualisation spatiale et de relation spatiale sont insuffisantes et se conjuguent à un manque de connaissances géométriques. Que la représentation de Cram soit observée à gauche ou à droite, les réponses erronées sont du même type et en même nombre, la capacité d'orientation spatiale des élèves est en cause. Le problème de visualisation mentale des substituants des carbones ne dépend donc pas nécessairement de la position du carbone par rapport à l'observateur. Un grand nombre d'élèves ayant répondu représentent le carbone proche par un cercle, et le carbone éloigné par un point. Cette erreur peut être mise sur le compte d'une difficulté d'ordre sémiologique (méconnaissance du code de représentation) ou sur celui d'une difficulté d'orientation spatiale, sans qu'il soit possible de trancher.

Le libellé des questions et les réponses apportées par les élèves ne permettent pas de déterminer la nature spatiale ou analytique, ou mixte des raisonnements conduits. Cependant, les capacités de traitement et de conversion des représentations sémiotiques ne sont pas opératoires. Elles nécessitent la formation d'une représentation spatiale interne qui peut inclure la visualisation mentale et qui doit mobiliser des connaissances sémiologiques, géométriques et chimiques à améliorer et à conjuguer efficacement. L'enseignement de raisonnements analytiques pour pallier les difficultés de visualisation mentale fréquentes ne s'improvise pas.

Les résultats de cette étude, préoccupants parce qu'ils ne font état d'aucune appropriation durable des élèves, sont à replacer dans le contexte béninois. Peu de lycées sont équipés de modèles moléculaires, encore moins d'ordinateurs. Les enseignants montrent aux élèves des photos de modèles moléculaires, ce qui ne lève que partiellement la difficulté qui consiste à

imaginer une structure tridimensionnelle à partir d'une représentation plane, ou usent d'analogies. Enfin, le temps écoulé (quelques mois) entre l'enseignement et la date de passation du questionnaire papier a pu constituer un obstacle à la réminiscence des concepts de stéréochimie dans la mesure où ceux-ci ne sont pas réactivés dans la suite du programme de chimie organique. Cependant la nature des difficultés constatées est corroborée par celles mises en évidence par d'autres recherches portant sur des étudiants. Les représentations de Cram sont maintenant au programme de terminale en France, et l'on peut suspecter que les élèves rencontrent certaines des difficultés qui s'y rattachent et mises en évidence par cette étude.

Les difficultés mises en évidence dans cette recherche portent pour une grande part sur la capacité de visualisation des représentations planes proposées, et notamment sur la place de l'observateur vis-à-vis de l'objet représenté. Faire le lien entre la place de l'observateur et la forme réelle de l'objet représenté à partir d'une représentation codifiée est une difficulté redoutable, comme en attestent l'absence de réponse correcte à la question 1 et la représentation C1b (Figure 23). La question de la visualisation d'un objet par un observateur selon la position qu'il occupe par rapport à cet objet, a aussi été travaillée dans un cadre totalement différent, le projet EVEILS, où on ne peut plus négliger l'information lumineuse qui parvient à l'œil. Cette participation à un projet de didactique de la physique a constitué une étape importante³² dans mon intégration à l'équipe de recherche (le LDAR) à laquelle j'appartiens.

II.3. Le projet EVEILS : génération d'un espace virtuel et appréhension d'un monde inaccessible

Le projet EVEILS (Environnement Virtuel pour l'Éducation et l'Illustration Scientifiques),³³ a associé des partenaires de différents horizons, physiciens, informaticiens et didacticiens de la physique, et visait à développer un démonstrateur immersif en trois dimensions permettant d'explorer le potentiel de la Réalité Virtuelle, qui génère des situations physiques inaccessibles dans le monde ordinaire, auxquelles un individu immergé dans le démonstrateur pouvait se confronter. L'un des objectifs du projet consistait à étudier les modifications cognitives chez les personnes testées, de déterminer les conditions qui les suscitent, ainsi que de caractériser les avantages éducatifs que procure une immersion dans un espace virtuel à trois dimensions. L'usage de l'environnement virtuel a nécessité l'élaboration de scénarios d'utilisation et d'apprentissage. Dans la dernière phase du projet des vidéos ont été construites. Le démonstrateur immersif comme les vidéos sont le résultat d'une simulation informatique complexe (Doat, Parizot, & Vézien, 2011) fondée sur un modèle mathématique sophistiqué correspondant à des choix physiques, par exemple celui de ne pas tenir compte de la nature ondulatoire de la lumière pour obtenir un rendu acceptable.

Les vidéos représentent ce qu'on obtiendrait dans un espace de réalité virtuelle où les individus et les choses se déplaceraient à une vitesse proche de celle de la lumière. L'appropriation de ces vidéos (dont il est souhaité qu'elle génère une compréhension de certains concepts de relativité restreinte) repose sur l'attention portée par les étudiants à certains traits de surface, attitude que l'on retrouve par exemple dans l'appréhension des systèmes sémiotiques dédiées à la

³² Elle a d'une part favorisé mon intégration à l'équipe et a d'autre part été une expérience très enrichissante, puisque participer à un projet de recherche ANR (Agence Nationale de la Recherche) pour un chercheur débutant est très formateur.

³³ Projet dirigé par Étienne Parizot soutenu par l'ANR, programme blanc, de mai 2009 à août 2012.

chimie. Finalement cette recherche mettait en scène un modèle, alimentant une simulation qui a produit un espace virtuel, reconstitué ensuite en vidéo.

II.3.1. Les étapes du projet

Pour déterminer les raisonnements mis en œuvre par des utilisateurs potentiels confrontés à des situations de cinématique classique et relativiste, une enquête par questionnaire auprès d'étudiants professeurs a révélé que la notion d'événement était problématique (la plupart semblent incapables de produire un raisonnement reposant uniquement sur la localisation spatio-temporelle des observateurs lorsque la vitesse de ceux-ci est mentionnée, comme si la vitesse « contaminait » l'événement) et que celle de référentiel se réduisait souvent à l'idée « d'observateur » (de Hosson, Kermen, & Parizot, 2010). La conception des scénarios visait à permettre la construction ou la reconstruction des concepts d'événements et de référentiel, le choix de l'équipe a abouti à des scénarios mettant en scène un billard avec des palets cylindrique en mouvement de translation sans frottement (de Hosson, Doat, Kermen, & Vézien, 2012). Ces scénarios tiennent compte à la fois des contraintes informatiques spécifiques de la réalité virtuelle, des lois physiques et des contraintes didactiques qui incluent notamment la prise en compte des difficultés des utilisateurs potentiels du démonstrateur immersif. Dans celui-ci la vitesse de la lumière a été choisie égale à 1 m/s, la nature ondulatoire de la lumière et l'effet Doppler n'ont pas été implémentés (la conséquence aurait été une modification des couleurs et de la luminosité). Tous les mouvements de l'utilisateur et ceux des objets sont calculés selon un algorithme qui applique la transformée de Lorentz à chaque point de la scène. Ce que l'observateur voit résulte de la combinaison des déformations relativistes intrinsèques et de celles induites par la durée de propagation de la lumière.

Cinq utilisateurs ont été immergés individuellement et ont dû expliquer des effets singuliers qui leur étaient présentés (instants de collision, vitesse des palets, forme des palets). Les résultats de l'analyse des propos tenus par les utilisateurs indiquent que les effets observés leur permettent d'apprécier l'importance de la prise en compte du délai de propagation de la lumière envoyée par chaque point des objets virtuels et d'approcher ainsi la notion d'événement nécessaire à la compréhension des effets relativistes. Cependant aucun utilisateur n'a expliqué la déformation des palets comme résultant de la superposition de deux types de déformations (Maisch, de Hosson, & Kermen, 2012).

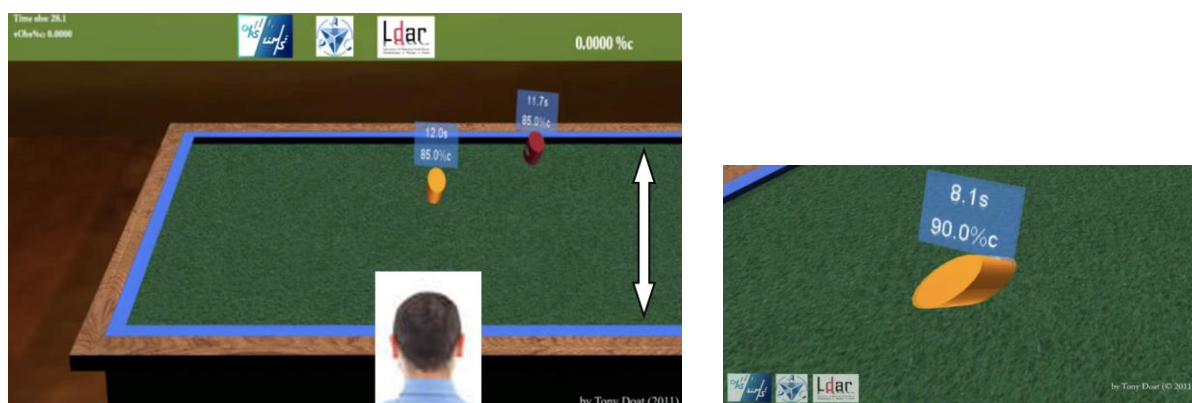


Figure 24 : Exemples reconstitués sur vidéo de ce que voit un observateur dans le démonstrateur

Devant l'impossibilité de faire venir à volonté des utilisateurs dans le démonstrateur immersif, il a été décidé de produire des vidéos reconstituant ce qu'un utilisateur immergé dans le démonstrateur aurait vu.

II.3.2. La dernière phase : usage de simulations vidéos

Les positions de l'observateur dans chaque vidéo ont été choisies en tenant compte des attitudes que les premiers utilisateurs avaient manifestées. Dans la dernière expérimentation, neuf étudiants de master MEF (futurs professeurs du secondaire) ont été interrogés selon la méthode d'entretien instrumenté devant un écran d'ordinateur avec commentaire à voix haute, le chercheur qui présentait les vidéos effectuant un guidage faible (Maisch, Kermen, Hosson, & Parizot, 2015). L'objectif de l'étude consistait à déterminer si les choix effectués étaient pertinents : d'un point de vue ergonomique, en matière d'angle de vue, de déplacement de l'observateur d'une part et d'un point de vue didactique en termes d'effets choisis permettant de mobiliser des éléments conceptuels relevant de la physique de la lumière et de la relativité restreinte d'autre part. Les scènes observées sur l'écran d'ordinateur concernent toutes, le mouvement horizontal sans frottement de deux ou trois palets sur un billard et le point de vue de l'observateur est imposé mais change d'une vidéo à l'autre. Ces vidéos constituent un référent empirique pour les étudiants dont la manipulation est contrainte et limitée à des relances de la scène, des arrêts sur image, des retours en arrière. Chaque vidéo correspond à une focalisation sur un aspect particulier (décalage des collisions des palets avec la bande du billard, différence de vitesse d'un palet à l'aller et au retour, déformation des faces des palets, inclinaison des palets.), bien que tous les phénomènes sur lequel l'attention de l'étudiant était portée, fussent visibles dans toutes les vidéos (voir Figure 24).

Les étudiants ont utilisé la faible latitude qui leur était laissée, d'agir sur le référent empirique, les moments de mise en pause ont été l'occasion pour certains d'une observation à voix haute suivie d'une relance de la vidéo pour rechercher une cause à l'effet identifié. Cependant le phénomène visé (décalage, vitesse, déformation, inclinaison) n'a pas toujours été identifié dans la vidéo dédiée, puisqu'ils étaient tous visibles dans chaque vidéo.

Les explications fournies mobilisent certains des éléments conceptuels attendus, mais au fur et à mesure de la passation des vidéos, la qualité des explications (articulation pertinente des éléments conceptuels) faiblit ce qui correspond à des raisonnements qui incluent de plus en plus de variables covariantes et à la nécessité de discrétiser un palet qui s'avère une difficulté redoutable. Comme dans l'étude réalisée dans le démonstrateur (Maisch et al., 2012), aucun étudiant n'a attribué les déformations à la superposition de deux types d'effets

Pourtant, l'étude comportait la passation d'une sixième vidéo comprenant des palets floutés en sus des palets déjà observés. Ces palets floutés correspondaient au résultat obtenu en enlevant dans la simulation la propagation de la lumière, donc ces palets (plus virtuels que les autres en quelque sorte) avaient une forme exclusivement due à la prise en compte de la transformée de Lorentz et une vitesse beaucoup plus grande que les autres palets. L'espoir un peu naïf de voir les étudiants expliquer l'origine de ces palets floutés a été totalement anéanti, aucun étudiant n'a imaginé qu'une telle modification ait pu être faite. En effet depuis le début des entretiens l'accent était mis sur la propagation de la lumière et imaginer qu'elle puisse ne plus être en jeu aurait relevé d'une rupture pure et simple du contrat didactique impensable aux yeux des étudiants. De plus plusieurs d'entre eux n'avaient jamais suivis de cours de relativité restreinte, donc attribuer les déformations des palets floutés à la prise en compte de la transformée de Lorentz était aussi impensable. L'échec de la passation de cette sixième vidéo a conduit à repenser totalement l'ordre de passation des vidéos et à suggérer un guidage plus fort de l'intervieweur, pour une prochaine étude (virtuelle à l'heure où ces lignes sont écrites).

II.4. Perspectives

Les programmes de lycée ont totalement changé en 2010-2012 au sens où l'évolution des systèmes chimiques telle qu'elle figurait dans le programme sur lequel mes recherches ont

porté, a disparu. Plus de critère d'évolution, plus de référence explicite à la distinction entre transformation chimique et réaction chimique et donc plus de possibilité par exemple de faire faire des prévisions à partir d'un système comportant initialement toutes les espèces chimiques mises en jeu lors de la transformation³⁴, ce qui avait constitué pour Chloé une forme de révélation du rôle de l'équation de réaction. Il n'est donc pas possible de prolonger l'étude des raisonnements des élèves de lycée sur les aspects en lien avec le critère d'évolution.

II.4.1. Étudier l'introduction des transformations chimiques

Cependant, la distinction faite entre les niveaux de savoir relevant de la réalité perçue, de la réalité idéalisée et des modèles est toujours valide et permet de guider l'analyse de raisonnements d'élèves au collège et au lycée, de pratiques enseignantes (comme cela a été fait dans Kermen & Colin, 2017), voire de constituer un canevas pour élaborer une séance d'enseignement.

Les schémas représentant ces différents types de savoirs (voir Figure 13 et Figure 14) sont toujours d'actualité et synthétisent une proposition à tester. Pour amorcer la différence de nature entre transformations chimiques et réaction chimique, il faudrait axer une première séquence sur le schéma suivant. Faire réaliser des transformations chimiques par les élèves, au lieu comme souvent, d'essayer de faire réaliser la même transformation à chaque binôme, il s'agirait de donner des quantités initiales suffisamment différentes pour que le résultat soit objectivement différent d'aspect : couleur plus ou moins foncée, masse plus ou moins importante de solide, etc. (la réalité perçue). Mais il faudrait aussi que ce résultat puisse conduire lors de l'identification des espèces chimiques (réalité idéalisée) au constat que ce sont les mêmes espèces qui sont apparues dans toutes les expériences réalisées (les mêmes produits), mais que selon les expériences le réactif limitant n'est pas toujours le même. Le bilan exhaustif des espèces présentes dans le système devrait faire l'objet d'une attention particulière, pour se demander ensuite, si un canevas commun ne se dégagerait pas. La réaction chimique, modèle de la famille de transformations chimiques étudiée (construction intellectuelle imaginée), pourrait être introduite. Et son écriture serait l'objet d'autres réflexions, mêlant la notion de substance (concept macroscopique) et celle de molécules (ou atomes) constituant la substance. Le constat macroscopique permet de déterminer les réactifs et les produits, le passage aux entités (modèle microscopique des espèces chimiques), permettrait alors de proposer une écriture microscopique de l'équation de réaction. Sans la notion de quantité de matière, l'écriture macroscopique n'est pas justifiable, elle serait imposée. À l'occasion d'études d'autres familles de transformations chimiques, sans mener une étude aussi exhaustive que la première fois, il pourrait dans la mesure du possible être prévu des mélanges initiaux différents pour chaque binôme d'élèves. Cette idée à étoffer (trouver une réaction chimique dont les caractéristiques permettent d'avoir une famille de transformations chimiques d'aspects suffisamment contrastés) pourrait faire l'objet d'une recherche visant à suivre l'évolution du raisonnement des élèves. Seraient travaillés en même temps et de façon dialectique, la construction d'habiletés pratiques, la construction de concepts et l'usage de la symbolique propre à la désignation des entités et espèces chimiques.

II.4.2. Étudier la conceptualisation de la liaison chimique

La liaison chimique est l'autre concept central autour duquel je souhaite orienter mes futurs travaux, notion autour de laquelle plusieurs des mémoires de master que j'ai dirigés portent. Il

³⁴ Tout ce qui était novateur en matière d'évolution des systèmes chimiques a été supprimé.

s'agit toujours de travailler la question de la dualité macroscopique-microscopique de la chimie, avec des modèles microscopiques moins élémentaires que ceux évoqués jusque-là.

Le concept de liaison chimique est abordé dans le programme de la classe de première S³⁵, celui de seconde ne mentionne pas le terme. Le programme de première est très intéressant car il aborde différents types de liaison sous différentes approches. Sont citées la liaison covalente et les formules de Lewis, l'interaction électrostatique dans les solides ioniques, l'interaction de Van der Waals et la liaison hydrogène à propos des solides moléculaires. Il s'agit d'une entrée par les structures au niveau des entités submicroscopiques. Le programme mentionne également les matières colorées, la dissolution de solides ioniques et moléculaires, les propriétés des matériaux, trois thèmes où il s'agit de faire une relation entre le microscopique et le macroscopique, ce qu'on désigne souvent par l'expression structure (des entités)-propriétés(des substances), qui a fait l'objet d'un certain nombre de recherches au plan international. Le programme aborde aussi les aspects énergétiques associés aux transformations chimiques et « *la conversion de l'énergie chimique* » ainsi que l'interprétation « *des échanges d'énergie entre lumière et matière à l'aide du modèle corpusculaire de la lumière* ».

L'enjeu de la relation structure-propriétés est bien de faire comprendre que les propriétés des entités du niveau moléculaire ne sont pas celles des objets du niveau macroscopique mais qu'elles permettent l'explication de propriétés des substances par la structure ou les interactions entre entités du niveau atomico-moléculaire. De nombreuses études rapportent que les élèves ont une tendance forte à attribuer au microscopique les caractéristiques du macroscopique³⁶ l'enjeu est donc réel. De plus, les travaux pionniers de Chomat, Larcher et Méheut (1988) ont montré la faisabilité d'une telle approche pour les états physiques de la matière, et ont inspiré la rédaction des programmes de collège et des documents d'accompagnement dans les années 1990. Or les auteurs du programme 2010 ne semblent pas connaître ces travaux puisqu'ils ont écrit à la rubrique notions et contenus du thème matières colorées « *Molécules organiques colorées : structures moléculaires, molécules à liaisons conjuguées* » et les compétences attendues correspondantes sont : « *Établir un lien entre la structure moléculaire et le caractère coloré ou non coloré d'une molécule* »³⁷. Il s'agit d'une maladresse des auteurs de programme qui ne manquera pas si elle n'est pas rectifiée, de renforcer les difficultés des élèves.

Dans son mémoire de master intitulé « *les molécules ont-elles une couleur ?* », Rachel Comte montrait que les manuels scolaires avaient pour certains reproduit le libellé du programme sans distance critique, pour d'autres parlé d'abus de langage. Cependant les entretiens exploratoires qu'elle avait menés avec des élèves indiquaient que cela ne semblait pas être un simple abus de langage, et que les élèves étaient peu capables d'articuler correctement les concepts microscopique et macroscopique permettant de rendre compte de la couleur d'une substance à partir de la structure moléculaire présentant des liaisons conjuguées, aucun ne faisant appel aux photons. En particulier l'interaction avec la lumière était omise, la couleur étant comprise comme une propriété intrinsèque de la matière ou des molécules.

Adry Manrique, dans son mémoire basé sur des entretiens exploratoire avec des élèves, a étudié l'appropriation par des élèves du concept de dissolution d'un solide ionique. Elle a mis en

³⁵ Bulletin officiel spécial n° 9 du 30 septembre 2010

³⁶ Pour une revue de la question consulter (Harrison & Treagust, 2002)

³⁷ Bulletin officiel spécial n° 9 du 30 septembre 2010, page 2/6 (page 128/160).

lumière l'absence de signification derrière les termes scientifiques utilisés par les élèves interrogés, une attribution de caractéristique macroscopique à des objets du niveau microscopique et inversement, une appropriation toute personnelle des représentations symboliques des diverses liaisons évoquées et une quasi absence de référence au mouvement des entités.

Ces deux études exploratoires m'ont convaincue qu'il était nécessaire d'aller examiner sur une plus grande échelle la nature exacte des difficultés préalablement constatées, afin ensuite de proposer des pistes pour améliorer la conceptualisation. Ce projet combinerait trois préoccupations : une première concernant la conceptualisation de l'interaction lumière matière pour expliquer la matière colorée dans le cas de certaines substances organiques faites de molécules à liaisons conjuguées ; une seconde autour de la conceptualisation du phénomène de dissolution de solides ionique et moléculaire pour sonder notamment si les élèves conçoivent les liaisons covalentes et les liaisons ioniques comme faisant partie d'un continuum ou correspondent à des concepts totalement opposés (Chaquin, Gutlé, & Reinhardt, 2014; Levy Nahum, Mamlok-Naaman, Hofstein, & Taber, 2010) ; une troisième préoccupation concernant la compatibilité des explications fournies pour la couleur et la dissolution. L'intérêt d'une étude combinant les deux approches (couleur et dissolution) est de sonder les élèves sur un aspect qui peut *a priori* être qualifié de statique, celui mentionnant les niveaux d'énergie pour expliquer la couleur, et l'autre, sur la dissolution *a priori* qualifié de dynamique où il est souvent fait référence au mouvement. Mais l'objectif d'une mise en relation des deux types d'appel au modèle serait de s'interroger sur la traduction en termes de position des atomes les uns par rapport aux autres ou de vitesse ou d'interaction électrostatique, lors de l'absorption d'un photon par la molécule, aspects évoqués justement lors de la dissolution.

Les substances et molécules ou ions intervenant dans ce type d'étude sont désignés par des représentations sémiotiques différentes (formules topologiques, tiret des liaisons dans les formules développées, tiret pointillé des liaisons hydrogène, absence de symbolisation pour les liaisons de Van der Waals et la liaison ionique) dont l'appropriation pourrait être également questionnée, celle-ci devant se construire aussi en synergie avec l'appropriation des modèles. Destin Mangane, dans sa thèse a montré que l'utilisation des représentations sémiotiques de Cram et des mots pour en parler favorisait une conception matérielle de la liaison chimique également notée par Adry Manrique dans un autre contexte.

Une autre direction d'étude interroge l'interprétation des effets énergétiques accompagnant les transformations chimiques et physiques de la matière. Une telle interprétation est l'occasion de mobiliser des concepts macroscopiques au sein d'un modèle macroscopique de l'énergie, et de les articuler avec le concept de liaison chimique au sein d'un modèle submicroscopique de la matière, dont Cooper et Klymkowsky (2013) considèrent qu'elle nécessite une approche interdisciplinaire mêlant les points de vue physique, chimique et biologique. La composition de l'équipe du LDAR me paraît pouvoir donner corps à ce projet et m'offrirait une nouvelle fois l'occasion de travailler avec des didacticiens d'une autre discipline. L'intérêt d'une telle étude au niveau secondaire est avéré, cependant il serait tout aussi intéressant de l'effectuer au niveau universitaire.

Partie B Recherches didactiques sur les pratiques enseignantes en chimie

Cette deuxième partie présente une synthèse de mes recherches autour des pratiques enseignantes, qui constituent une approche didactique de ces pratiques. Je situe cette approche dans le vaste champ des recherches sur les pratiques enseignantes avant de détailler le cadre théorique et méthodologique que j'utilise, la double approche didactique et ergonomique (Robert & Rogalski, 2002) adaptée aux enseignants de (physique-)chimie. Suivent ensuite les résultats des recherches que j'ai menées selon ce cadre et je conclus par des perspectives de recherche.

Ces recherches sont diffusées sous forme d'articles dans des revues (Kermen & Barroso, 2013) (Kermen, 2016b) (Kermen & Colin, 2017), d'un chapitre d'ouvrage (Kermen, 2015c), et de communications (Kermen & Colin, 2014) (Kermen, 2015a).

I.1. Étudier les pratiques enseignantes

J'ai adopté la définition des pratiques enseignantes proposée par Aline Robert pour qui les pratiques d'un enseignant regroupent « *tout ce qu'il pense, dit ou ne dit pas, fait ou ne fait pas, sur un temps long, avant, pendant et après la classe* » (Robert, 2008a, p. 59). L'ajout de « *qui n'est pas fait ou dit* » comme appartenant aussi aux pratiques (dans la lignée de Bru (2002) parlant de l'action de l'enseignant) marque la prise en compte explicite des choix faits par l'enseignant, qu'ils soient conscients ou inconscients.

Bru (2002) appelle à conforter et développer les recherches sur les pratiques enseignantes dans lesquelles il relève quatre grands types aux objectifs et au rapport entre la recherche et les pratiques, différents. Schématiquement chaque type correspond à l'étude des pratiques pour i) évaluer leur performance, ii) agir en aidant à leur transformation, iii) former les enseignants, iv) les décrire, les comprendre et les expliquer dans une visée heuristique (Bru, 2002). Pour cette quatrième perspective, il en appelle à constituer un large corpus afin qu'on parvienne à déterminer la réalité de ce qui se joue et se passe dans les classes, de la maternelle à l'université. Mes recherches, peu nombreuses pour l'instant, s'inscrivent dans ce quatrième type, elles ont avant tout une visée heuristique et focalisent sur l'enseignant, même si les élèves sont des acteurs incontournables des situations d'enseignement. Le bref inventaire que je conduis dans le paragraphe suivant, sur l'état des recherches didactiques sur les pratiques d'enseignants de physique-chimie, me paraît légitimer d'en rester à une visée heuristique, la formation ou l'intervention, devant s'inscrire après, lorsque la connaissance est suffisante de mon point de vue.

L'étude des pratiques des enseignants de physique-chimie dans le secondaire (ou de chimie s'agissant des enseignants du supérieur) constitue de fait un champ de recherche considérable, je me situe parmi les recherches qui privilégient une approche didactique des pratiques c'est-à-dire que la référence à l'enseignement d'un contenu donné ayant pour finalité l'apprentissage de ce même contenu, est centrale. Il s'agit aussi de montrer que l'approche didactique permet de spécifier la particularité du travail de ces enseignants par rapport à celui d'un enseignant de mathématiques ou de français (ou autre). Les caractéristiques épistémologiques et didactiques de la discipline chimie (ou physique) jouent également un rôle qu'il peut être intéressant

d'éclaircir au fil des différentes recherches. Je n'ai pas étudié comment des enseignants mettent en application des séquences d'enseignement innovantes (Jeannin, Veillard, & Tiberghien, 2010) ou issues de travaux de recherche, je restreins mes recherches aux pratiques ordinaires pour les décrire, les comprendre (recherche de signification) et inférer certaines des raisons qui commandent ce que les enseignants font (tentative d'explication). Cela passe par des observations de plusieurs enseignants pour effectuer des mises en relation permettant de repérer d'éventuelles régularités et des éléments de variation interindividuelle et intra-individuelle de leur activité en classe.

Jusqu'à présent mes recherches ont porté sur des enseignants de terminale lors de séances de TP de chimie, qui avaient pour objet soit l'introduction du critère d'évolution (Kermen, 2015c), soit sa mise en application comme préalable à l'étude des piles électrochimiques, en prenant appui sur les analyses du savoir et des raisonnements des élèves effectués dans ma thèse. Choisir un même thème permet de caractériser la façon dont chaque enseignant s'approprie le programme, ressent les contraintes institutionnelles qu'il véhicule et traduit cela dans la conception de la séance et dans la mise en œuvre pour les élèves particuliers auxquels il fait face. Montrer qu'il existe une certaine diversité dans la mise en œuvre d'un même thème, déterminer les raisons de le faire et les choix effectués, permet de connaître l'éventail des possibles.

Mes recherches complètent les quelques exemples d'études décrivant des pratiques ordinaires effectives³⁸ d'enseignants de physique-chimie en lycée (Venturini, Calmettes, Amade-Escot, & Terrisse, 2007) ou certains de leurs aspects (Cross & Le Maréchal, 2013; Pélissier & Venturini, 2016). D'autres recherches portent sur la mise au jour des connaissances professionnelles (Cross, 2010) ou plus nombreuses sur la caractérisation des pratiques au collège (par exemple Calmettes, 2010 ; Venturini & Tiberghien, 2012).

« Schön a montré que la pratique professionnelle n'est pas un domaine d'application de théories élaborées en dehors d'elle. Elle est le lieu de production constante de solutions nouvelles à des problèmes nouveaux (...) le professionnel construit son savoir professionnel par l'action et la réflexion dans et sur l'action » (Paquay & Sirota, 2001). Avec d'autres (Cross, 2010 ; Jameau, 2015; Park & Oliver, 2008; van Driel, Beijaard, & Verloop, 2001), je partage cette hypothèse que l'analyse du travail des enseignants permet d'accéder aussi à une partie de leurs connaissances professionnelles, ce qui constitue le deuxième axe de mes recherches sur les pratiques enseignantes. Beaucoup de recherches en ce domaine ont une visée de formation, en ce qui me concerne, je situe mes travaux dans une dimension compréhensive.

J'ai aussi participé à une recherche pluridisciplinaire, « Enseigner par l'étude de cas ou par l'exemple : quels rapports aux savoirs ? », projet soutenu par l'Institut des Humanités de Paris et porté par Caroline Leininger-Frézal, qui abordait l'usage des exemples et du cas dans l'enseignement de différentes disciplines à l'université. Ma participation au projet s'est concrétisée par la conduite de huit entretiens avec des enseignants appartenant à deux universités, j'ai donc abordé les pratiques déclarées d'enseignants universitaires de chimie à propos de l'usage des exemples (Kermen, 2016b). La méthodologie (pas d'observation de pratiques effectives) comme le thème lui-même, l'usage des exemples qui ne sont pas une modalité spécifique à l'enseignement de la chimie mais dont l'usage par contre répond à un questionnement de didactique de la chimie, tranche avec mes études sur les pratiques des enseignants du secondaire. Cependant, point commun de toutes mes recherches, j'ai cherché à identifier et analyser les choix faits par les enseignants à partir du cadre de la double approche didactique et ergonomique que je présente maintenant.

³⁸ Celles portant sur les pratiques déclarées sont également rares (Bécu-Robinault, 2007).

I.2. La double approche didactique et ergonomique

La double approche didactique et ergonomique (Robert & Rogalski, 2002) a d'abord été utilisée pour analyser les pratiques en mathématiques d'enseignants du second degré (Vandebrouck, 2008) ou du premier degré (Butlen, Peltier-Barbier, & Pézard, 2002), puis légèrement adaptée pour étudier l'activité d'enseignants de physique-chimie au lycée (Kermen & Barroso, 2013; Kermen & Colin, 2014, 2017). Ce cadre théorique et méthodologique vise à rendre compte de la complexité et de la cohérence des pratiques d'enseignants, considérés comme des professionnels exerçant un métier qui comporte des contraintes et des ressources (Robert & Rogalski, 2002).

I.2.1. La double approche s'inscrit dans la théorie de l'activité

Rogalski (2003) s'appuyant sur Leontiev déclare que la double approche s'inscrit « *dans la lignée des théories de l'activité* ». En psychologie ergonomique, la distinction entre tâche et activité est essentielle. La tâche est le but à atteindre dans des conditions données (Leplat & Hoc, 1983), l'activité est ce qu'entreprend le sujet pour accomplir une tâche. Elle comprend les actes extériorisés mais aussi ce qu'on ne voit pas, les hypothèses, les décisions (Rogalski, 2003).

Les tâches de l'enseignant sont définies et prescrites par l'institution dans laquelle il travaille, les tâches effectives sont inférées de l'activité de l'enseignant et résultent de la représentation qu'il se fait des tâches à accomplir (Rogalski, 2003). Des enseignants différents ont une activité différente parce qu'ils ne lisent pas nécessairement les prescriptions de la même manière et s'en font donc une représentation singulière. De plus la tâche de l'enseignant est discrétionnaire (Pastré, 2007) car l'institution laisse une grande latitude aux enseignants pour accomplir leur mission. En analyse du travail l'hypothèse est faite que toute activité combine variabilité, qui correspond à l'adaptation du sujet à la situation particulière, et invariance, qui constitue l'organisateur de l'activité (Pastré, 2007).

De même, les élèves se représentent les tâches proposées par l'enseignant (jouant alors le rôle de prescripteur) de façon variable selon leurs connaissances et leur motivation du moment notamment. Une hypothèse forte de la double approche est que l'activité développée par un élève pour résoudre une tâche est un vecteur d'apprentissage *potentiel* (Robert & Rogalski, 2002). En effet, la réalisation de la tâche ne signifie pas nécessairement qu'il y a apprentissage ou restructuration de connaissances. Elle constitue l'activité productive grâce à laquelle l'élève transforme le réel, qui peut s'accompagner de l'activité constructive, la transformation de l'élève lui-même, la restructuration de ses connaissances (Pastré, 2007). L'aide de l'enseignant peut être déterminante pour favoriser cette activité constructive, qui correspond à apprentissage.

Une spécificité du travail de l'enseignant soulignée par Amigues (2003) et qui le rend singulier en comparaison d'autres métiers analysés en didactique professionnelle, réside dans le fait que l'enseignant est concepteur des tâches qu'il prescrit à l'élève et dont il contrôle lui-même l'exécution. Cela autorise les enseignants expérimentés à opérer des modifications de tâches en cours de réalisation (Kermen & Colin, 2017) ou même à en supprimer (Kermen, 2015a), alors qu'un enseignant débutant hésite à apporter des modifications en cours de réalisation par rapport à son projet, puisqu'il souhaite vivre ce qu'il a prévu avant de passer à d'éventuels changements (Kermen, 2015c).

Un observateur n'a accès qu'aux actes observables, les traces de l'activité des élèves comme de l'enseignant, parce que l'activité n'est pas directement observable puisqu'elle regroupe aussi les pensées et ce que le sujet ne fait pas dans la réalisation de la tâche. En théorie de l'activité, il y a une organisation hiérarchique de l'activité (Coulet, 2011). L'activité est orientée par un motif et un besoin, l'action est relative au but à atteindre et les opérations aux méthodes mises en œuvre

dans les conditions spécifiques de la situation considérée (Vieira & Kelly, 2014) pour accomplir l'action. Action et opération ne sont pas vraiment distinguées dans la double approche comme le font d'autres auteurs (Jeannin et al., 2010) (Vieira & Kelly, 2014), et ce que fait l'enseignant sera désigné sous le terme action ou actes.

L'activité d'un enseignant désigne une partie délimitée de ses pratiques dans le temps et dans l'espace (Robert, 2012) ; l'activité en classe constitue ce qu'il développe durant une séance de classe pour parvenir au but qu'il s'est fixé, enseigner tels contenus à tels élèves.

I.2.2. L'origine de la double approche

Dans un article que je considère comme annonciateur de la double approche, Aline Robert (1999) définit (et étudie) les pratiques en classe des enseignants de mathématiques qui sont tout ce que dit et fait l'enseignant en classe, en tenant compte « *de sa préparation, de ses conceptions et connaissances en mathématiques et de ses décisions instantanées* ». Les projets ou lignes d'action de l'enseignant, constituent une mise en acte de ses conceptions, une mise en fonctionnement de ses connaissances avant la réalisation effective devant une classe (Robert, 1999). Cette réalisation s'effectue au moyen de « *singularisations* », propres à chaque enseignant et qui sont des « *traductions de la combinatoire originale de ses actes techniques et de ses lignes d'action lorsqu'il est confronté à une classe particulière* » (Robert, 1999). À cette époque, cette modélisation des pratiques n'autorise qu'une analyse didactique caractérisant l'itinéraire cognitif et l'accompagnement proposé aux élèves par les enseignants. Cela ne suffisait pas pour comprendre les choix faits par les enseignants de mathématiques, qui se traduisaient en régularités ou variabilités des pratiques enseignantes (Robert & Rogalski, 2002), bien que ce qui deviendra la composante personnelle des pratiques soit déjà évoqué. Prendre en compte des facteurs extérieurs à la classe, des déterminants des pratiques, tels que le programme, les habitudes professionnelles, le milieu social des élèves a constitué une avancée permettant l'énoncé d'explications (Robert & Rogalski, 2002).

Analyser les pratiques revient alors à analyser le travail d'un enseignant en tant que personne singulière en tenant compte des contraintes auxquelles il fait face (aspect ergonomique) et des particularités des situations d'enseignement-apprentissage (aspect didactique).

I.2.3. Les composantes des pratiques

La double approche didactique et ergonomique considère les pratiques enseignantes comme constituées de cinq composantes. L'étude des pratiques enseignantes en classe s'effectue au travers de l'examen des activités possibles des élèves dans les séances observées. Pour concevoir une séance l'enseignant choisit des tâches (type, ordre) pour les élèves qu'il accompagne en général lors de la mise en œuvre d'aides, d'indications ou de modifications destinées à maintenir une ambiance de travail, faciliter l'accomplissement de la tâche et provoquer la conceptualisation. Ces aspects correspondent aux composantes cognitive et médiative des pratiques. Les choix de tâches et d'accompagnement sont influencés diversement par les programmes, les ressources, les types d'élèves, les conditions de travail dans l'établissement, le travail en équipe, les habitudes professionnelles des enseignants de la discipline, les connaissances et conceptions de l'enseignant. Ces déterminants des pratiques sont rassemblés dans les composantes institutionnelle, sociale et personnelle des pratiques (Figure 25). Les cinq composantes des pratiques et différents niveaux d'organisation de l'activité (microscopique, local ou global selon le type d'étude) sont combinés pour reconstituer les logiques d'action des enseignants et révéler la cohérence des pratiques.

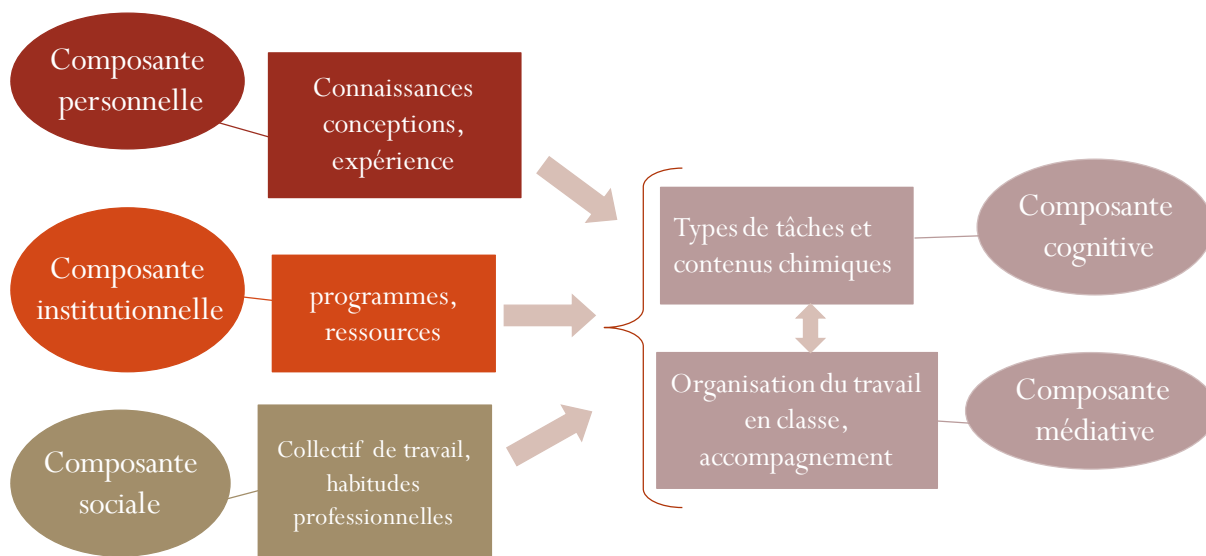


Figure 25 : Une représentation des cinq composantes des pratiques (Kermen, 2014, 2016c)

L'adaptation de la double approche, initialement utilisée en didactique des mathématiques, à l'étude des pratiques d'enseignants de physique-chimie a consisté à prendre en compte quelques déterminants supplémentaires. Du côté des ressources, les salles spécialisées, le matériel expérimental à disposition ainsi que les produits chimiques disponibles dans l'établissement constituent des facteurs qui peuvent influencer sur l'activité en classe (Kermen & Barroso, 2013 ; Kermen & Colin, 2017). Le collectif de travail comprend aussi les préparateurs qui installent le matériel dans les salles et préparent les solutions, les relations que l'enseignant entretient avec les préparateurs, la coordination entre l'enseignant et les préparateurs peuvent jouer un rôle sur l'activité en classe.

La composante personnelle des pratiques a été adaptée en considérant que les représentations et connaissances de l'enseignant, son expérience concernaient la chimie et l'enseignement de la chimie (ou de la physique).

1.2.4. Une méthodologie mixte

La méthodologie associée au cadre consiste à analyser *a priori* les tâches que l'enseignant prévoit pour les élèves, c'est-à-dire avant leur réalisation en classe. Cette analyse est possible à partir de textes d'exercices ou de protocoles de TP par exemple. Quand il s'agit de cours, si le projet de séance est inconnu, la difficulté consiste à reconstruire ce projet à partir de l'observation de la séance en faisant abstraction des interventions des élèves pour ensuite analyser les improvisations, ajustements, adaptations effectués pour tenir compte des réactions des élèves.

L'analyse principale porte sur le déroulement en classe et caractérise l'organisation du travail, l'étayage de l'activité des élèves. Selon les études une attention particulière peut être prêtée aux interactions langagières, ce qui nécessite éventuellement alors l'adjonction d'un cadre complémentaire. À l'analyse principale s'ajoutent des questionnaires ou des entretiens s'adressant à l'enseignant, puis les résultats des différentes analyses sont croisés pour reconstituer les choix de l'enseignant.

L'observation en classe s'effectue par des captations vidéo. En mathématiques Robert et les membres de son équipe ont toujours mis une caméra en fond de classe sans observateur (Robert & Vivier, 2013) pratiquement hors champ visuel de l'enseignant. Dans mes recherches, au

contraire un observateur (ou plusieurs parfois avec l'accord de l'enseignant) assiste en fond de classe notamment pour régler la caméra qui zoome sur le tableau au besoin et sur l'enseignant lors d'interactions particulières avec des binômes d'élèves en TP. L'enseignant a ensuite (plusieurs semaines après) été placé devant sa vidéo de classe avec consigne de commenter ce qu'il voyait et entendait, s'il le jugeait nécessaire. Jusqu'à présent, l'enseignant a visionné toute sa séance (ce qui peut être long, pour un TP de près de deux heures effectué successivement avec deux groupes) et comme il s'agissait de le mettre en position d'un professionnel commentant sa pratique et non pas dans celle d'un professionnel jugé et critiqué, il n'y a pas eu de questions posées sur les thèmes qu'il ne commentait pas lui-même. Cet aspect limite la portée de cet entretien et des analyses qui en sont tirées. Cependant il permet d'accéder aux aspects et aux choix qui importent à l'enseignant et peut procurer des informations sur sa représentation du métier.

Lors de la réalisation effective devant une classe, l'action de l'enseignant est perceptible pour le chercheur grâce à des observables ou des actes techniques qui sont les déplacements de l'enseignant, les écrits au tableau, le discours et les silences, les gestes aussi (Robert, 1999).

I.2.5. Analyse des tâches

Suivant ce qui a été effectué en didactique des mathématiques (Robert, 2008b), l'analyse des tâches en didactique de la chimie (ou de la physique) s'attache à déterminer si les élèves doivent mobiliser des connaissances, des savoir-faire anciens ou nouveaux, les adapter, lors de tâches simples ou plus complexes pour atteindre le but fixé. Une tâche simple met en jeu une connaissance ou un savoir-faire cité dans sa formulation. La réalisation d'une tâche plus complexe nécessite des connaissances, des savoir-faire et une réflexion conduisant à la mise en œuvre d'étapes qui ne sont pas précisées dans la formulation de la tâche. Le type d'aide fournie par l'enseignant peut alors s'avérer déterminant lors d'une résolution en classe, individuelle ou collective, et, s'il modifie radicalement les conditions de réalisation de la tâche, la transforme en une tâche redéfinie.

I.2.6. Activité de l'enseignant ou pratiques enseignantes ?

La reconstitution des choix permet d'inférer certaines logiques d'action de l'enseignant, ce qui fait qu'il agit comme il agit, et correspond à la mise au jour du sens de l'activité de l'enseignant. Expliquer l'activité (ou les pratiques) consiste à montrer sa (leur) cohérence. Le projet de séance et sa réalisation incarnent les choix qui résultent de l'influence de diverses contraintes intériorisées par l'enseignant. Les pratiques des enseignants expérimentés et donc leur activité en classe, sont considérées comme cohérentes (Robert & Rogalski, 2002) c'est-à-dire que les différents choix d'un enseignant ne sont pas contradictoires, ils procèdent d'une unité sous-jacente (Robert, 2004).

Les composantes des pratiques ont été définies à partir de l'observation et de l'analyse de nombreuses activités d'enseignants (Robert, 2008b ; Robert & Rogalski, 2002 ; Vandebrouck, 2008). Elles rassemblent les caractéristiques générales pertinentes qui dans ce cadre permettent de parvenir à l'objectif recherché, décrire et analyser les pratiques pour les comprendre tout en rendant compte de leur complexité. Lorsqu'on étudie l'activité d'un enseignant, qui peut correspondre à une échelle très locale, il s'agit d'une partie de ses pratiques, ce qui légitime pleinement de conserver les mêmes critères d'analyse que pour les pratiques qui concernent une échelle plus globale.

Les observations que j'ai menées jusqu'ici sont cantonnées à la classe de terminale, classe d'examen où la contrainte institutionnelle est forte, et appartiennent au champ des recherches sur les pratiques effectives. Elles visent à décrire l'activité d'une enseignante observée lors de

deux séances en demi-groupes sur un même TP pour approcher ses logiques d'action (Kermen & Barroso, 2013), à comparer l'activité de trois enseignantes sur un même thème (Kermen & Colin, 2014, 2017) pour mettre en évidence la marge de manœuvre investie, à comparer la mise en œuvre d'une séance sur un même thème par deux enseignants dont un débutant (Kermen, 2015c). Ces études sont locales et en ce sens il paraît plus rigoureux de considérer qu'il s'agit d'études de l'activité enseignante (un sous-ensemble des pratiques) que d'études de pratiques pour lesquelles il faudra passer à une échelle plus grande, ce qui signifie, sur une durée plus grande, pour différents enseignants et différents contenus disciplinaires.

I.3. Activités d'enseignants de physique-chimie : une étape vers la caractérisation de leurs pratiques

Les publications auxquelles j'ai fait référence précédemment regroupent deux vagues d'observation sur des thèmes en lien avec le critère d'évolution en classe de terminale. Une première consacrée à la séance d'introduction du critère d'évolution met en scène deux enseignants³⁹, Dora (environ 10 ans d'expérience) et Bud dont c'est la première année en terminale ; une séance de Dora et celle de Bud sont comparées dans (Kermen, 2015c) et les deux séances de Dora le sont entre elles dans (Kermen, 2015a).

La deuxième vague est consacrée à l'introduction du thème des piles électrochimiques (qui comporte l'utilisation du critère d'évolution) et à trois enseignantes madame Branly (étudiée dans Kermen & Barroso, 2013), madame Say et madame Forest (nommée Dora dans la première vague) dont les activités sont comparées dans (Kermen & Colin, 2014, 2017). Le contexte des deux vagues d'observation (récapitulatif dans le tableau 2) est bien différent.

Dans le premier cas, les participants ont assisté à une courte séance de formation continue de trois jours intitulée « enseigner l'évolution des systèmes chimiques » en direction des enseignants de terminale. La formation visait à approfondir les connaissances disciplinaires et didactiques des stagiaires, favoriser le développement de nouvelles connaissances, encourager la réflexion afin de révéler les habitudes d'enseignement et d'en amorcer une éventuelle modification. Le premier jour de formation a été consacré à la présentation des trois modèles pouvant être utilisés et figurant dans le programme ainsi qu'aux raisonnements et difficultés des élèves susceptibles d'être rencontrés. Les stagiaires ont été informés qu'ils devaient préparer un plan de séance qu'ils exposeraient aux autres stagiaires lors du deuxième jour de formation, qu'ils acceptaient de le mettre en œuvre en étant filmés, qu'ils choisiraient des extraits de vidéo qu'ils commenteraient le troisième jour de la formation devant leurs collègues stagiaires. Les deux seuls participants au stage ayant une classe de terminale qui ont assisté à la deuxième journée de formation étaient un titulaire remplaçant (Bud) qui avait pris en charge la classe de terminale au mois d'octobre et une enseignante ayant 4 années d'exercice en classe terminale (10 ans au total). Ils ont accepté d'être filmés.

³⁹ Je les ai appelés Dora et Bud pour faciliter l'écriture en anglais, ce sont des pseudonymes.

Tableau 2 : récapitulatif de quelques caractéristiques des observations faites

| enseignant | Ancienneté globale en années (en terminale) | Date d'observation | thème | Nombre de séances observées | Publication |
|----------------------|---|--------------------|-------------------------|-----------------------------|---|
| Dora (madame Forest) | 10(4) | Mars 2011 | Introduction du critère | 2 TP | Kermen, 2015a,c |
| | | Mars 2012 | piles | 2 TP | Kermen & Colin, 2014, 2017 |
| Bud | 2 (0) | Mars 2011 | Introduction du critère | 1 TP | Kermen, 2015c |
| Madame Branly | 30 (~20) | Mars 2012 | piles | 2 TP | Kermen & Barroso, 2013 ; Kermen & Colin, 2014, 2017 |
| Madame Say | 15 (~10) | Mars 2012 | piles | 1 TP | Kermen & Colin, 2014, 2017 |

Dans la seconde vague d'observation, les participants n'ont pas suivi de formation à mon instigation.

I.3.1. Caractérisation de l'activité de madame Branly

Chronologiquement il a d'abord été effectué une étude de cas analysant l'activité ordinaire d'une enseignante, madame Branly, lors des deux séances successives de travaux pratiques avec une même classe, qui vise à comprendre cette activité en cherchant à identifier ce qui la détermine et l'influence. Je résume les principaux résultats parus dans (Kermen & Barroso, 2013)

L'enseignante élabore une fiche TP exhaustive sur le thème des piles électrochimiques. D'une façon générale, à quelques nuances près, elle propose les mêmes tâches aux élèves dans les deux groupes, ils travaillent en autonomie sur les mêmes contenus, et elle s'appuie sur les mêmes anecdotes. La seule différence notable est l'incident « précipité ». Elle guide fortement les réponses des élèves, pour aller à l'essentiel et se charge de compléter longuement par des moments d'exposition du savoir. Les phases de manipulations des élèves sont réduites, car elles prennent du temps, elle contrôle tous les montages expérimentaux n'accordant que peu d'autonomie aux élèves et privilégie des aides procédurales. La forte similitude des séances apparaît comme une conséquence du guidage élevé des élèves lors des phases collectives et de la faible autonomie qui leur est accordée dans les manipulations.

En comparant le déroulement des deux séances d'une même classe pour une même enseignante, on peut identifier des variabilités susceptibles d'être attribuées aux comportements des élèves puisque les contraintes et le projet de séance sont les mêmes. Effectivement, les variabilités identifiées correspondent à une improvisation ou des modifications apportées en réponse aux besoins des élèves. Dans le groupe 2, en réponse à la demande d'observation un élève annonce qu'il y a un précipité lorsqu'il voit la poudre de cuivre en suspension dans la solution. L'enseignante passe alors trois minutes à sonder les élèves et à faire une mise au point comportant une expérience. Dans ce même groupe l'enseignante interagit beaucoup plus avec les élèves (le nombre de tours de parole est presque doublé). Elle passe systématiquement voir tous les binômes d'élèves lors de la deuxième expérience, ce qu'elle justifie en déclarant qu'elle veut les obliger à travailler ayant constaté en début d'année qu'ils suivaient moins bien les consignes que les élèves de l'autre groupe.

Les analyses menées permettent de caractériser une activité fondée sur une forte cohérence disciplinaire, contrainte par le temps et cantonnant la contribution orale des élèves à quelques moments précis pour mieux les accompagner. Madame Branly est conduite par l'exigence qu'elle se donne de faire tout ce que préconise le programme (contrainte institutionnelle très forte pour elle), de présenter les différents contenus selon une progression conceptuelle qu'elle estime logique (influence de la composante personnelle sur la composante cognitive), de préparer ses élèves à réussir le jour de l'examen (composante institutionnelle) et aussi ultérieurement en classe préparatoire. Finir le programme est un argument évoqué d'abord pour cette poursuite d'étude et non pour la préparation de l'examen ce qui donne à penser qu'elle se sent contrainte par une certaine exigence sociale aussi.

Les choix effectués par l'enseignante sont cohérents avec la représentation qu'elle semble avoir de sa mission, à savoir présenter aux élèves le plus d'aspects possibles du thème étudié pour qu'ils réussissent à l'examen et pour les meilleurs qu'ils soient admis en classe préparatoire. Ces préoccupations déjà visibles dans les déclarations faites en classe sont confirmées dans l'entretien face à la vidéo. Ce double objectif, l'examen et les études ultérieures, a déjà été relevé pour une enseignante de première (Venturini et al., 2007) et pour une enseignante de terminale (Cross & Le Maréchal, 2013) et s'est traduit dans ce dernier cas par deux types d'évaluations différentes au cours de l'année. Sa mise en œuvre, spécifique à chaque enseignant(e), constitue une illustration de la marge de manœuvre qu'il ou elle investit en interprétant les prescriptions institutionnelles sous l'influence du contexte social.

Cette première étude m'a permis de commencer à m'approprier le cadre de la double approche, que ce soit le cadre théorique comme la méthodologie, dont les différents éléments se sont révélés nécessaires à la mise au jour et l'explicitation des influences contribuant à l'activité de l'enseignante. Le fait de n'avoir observé l'enseignante que pour un seul contenu thématique, et uniquement en TP conduit à ne pas caractériser les pratiques proprement dites, l'étude étant trop restreinte. Elle montre que l'activité est complexe, cohérente et peut être décrite par une imbrication des composantes des pratiques. Ce résultat n'est pas surprenant eu égard à ceux obtenus en didactique des mathématiques, mais il plaide pour l'intérêt de l'export du cadre à une autre didactique.

I.3.2. Trois activités contrastées analysées sur le thème des piles électrochimiques

Comparer l'activité de trois enseignantes sur un même thème conduit à utiliser des données importantes, et à devoir faire des choix pour rendre compte des aspects les plus caractéristiques à savoir les points communs, différences et particularités. L'étude a donné lieu à deux publications successives, de longueurs inégales, l'une dans les actes des rencontres de l'ARDIST (Kermen & Colin, 2014) l'autre est à paraître dans la revue *Éducation et Didactique* (Kermen & Colin, 2017). Ces études ont pour finalité de documenter les pratiques pour trouver des éléments expliquant les variabilités, et les régularités.

Dans un premier temps (Kermen & Colin, 2014), nous avons axé notre questionnement sur la mise en évidence des différents facteurs appartenant aux cinq composantes des pratiques pour éclairer les choix des enseignantes dans leur activité en classe. Il s'agissait de déterminer si ces facteurs interviennent de façon à renforcer la prise de décision (imbrication positive) ou au contraire entrent en tension. L'analyse s'est portée sur trois points caractéristiques des différences observées à la fois dans la conception de la séance (analyse *a priori* des fiches TP) et dans son déroulement ensuite, malgré une structure d'ensemble des contenus similaires : i) les dispositifs expérimentaux utilisés pour étudier la pile, ii) la prise en compte du signe affiché par l'appareil de mesure et iii) la distinction opérée ou non entre circuit fermé et circuit ouvert.

Nos analyses ont montré que les choix effectués étaient le fruit d'une interaction entre des facteurs appartenant à différentes composantes. Nous avons déterminé des cas d'imbrication de facteurs venant renforcer un choix : lorsque madame Branly présente d'abord la pile Daniell « historique » où composantes personnelle et institutionnelle des pratiques s'allient, ou lorsque madame Forest met en scène l'introduction du pont salin où les composantes cognitive et médiative sont fortement imbriquées. Cette interaction peut également se manifester sous la forme d'une tension entre facteurs et le choix peut s'apparenter alors à un compromis. Ainsi en est-il de la réaction de madame Forest qui, bien que marquant lors de l'entretien son désaccord envers la mesure de tension (imposée par le programme), la fait réaliser par les élèves tout en estimant qu'il leur est difficile de l'interpréter. La composante institutionnelle prend ici le pas sur la composante cognitive, cette tension étant la conséquence d'un choix personnel de l'enseignante, enseigner l'électricité en fin d'année. Mesdames Say et Forest choisissent de faire raisonner les élèves à partir du signe affiché par l'appareil de mesure afin de déterminer le sens conventionnel du courant dans le circuit. Elles s'opposent ainsi à l'habitude enseignée par leurs collègues des classes antérieures qu'elles ne partagent pas, et interpellent les élèves avec des arguments qui remettent en question cette habitude. Ce choix montre que la composante personnelle des pratiques entre en tension avec la composante sociale.

Dans un second temps (Kermen & Colin, 2017), nous avons restreint les analyses comparatives à la réalisation de la première tâche de la fiche TP, correspondant à la mise en œuvre du critère d'évolution. Les déroulements ont été analysés en adaptant le fonctionnement du modèle thermodynamique issu de mon travail de thèse (Kermen & Méheut, 2011) pour répondre à deux séries de questions de recherche. La première série concernait la façon dont les enseignantes mettent en scène le contenu traité dans les séances pour susciter l'activité des élèves. La seconde série de questions visait à caractériser le travail des enseignantes en recherchant des régularités et des variations et en reconstruisant leurs logiques d'action en termes d'imbrications et, ou tensions entre composantes des pratiques pour comprendre les choix effectués. Je rapporte les résultats auxquels nous sommes parvenus pour cette deuxième série, un bref aperçu de certaines stratégies menées par les enseignantes a été mentionné lors de la présentation de raisonnements d'élèves (voir Partie AII.1.1.2 et Partie AII.1.2).

Les trois enseignantes ont choisi d'étudier une première transformation chimique interprétée par l'équation de réaction de la pile Daniell, objet de la deuxième tâche, et ne questionnent pas le passage du premier dispositif expérimental à celui d'une pile. Il pourrait s'agir d'une manifestation d'habitudes professionnelles en accord avec ce que l'on trouve dans le document d'accompagnement du programme et dans les manuels scolaires. Bien que les élèves soient en salle de TP, où ils pourraient être en autonomie et devoir produire un document ou une réponse argumentée et élaborée à une question en fin de séance, les moments de dialogue collectif précèdent l'institutionnalisation par l'enseignante. On assiste à une forme de cours dialogué, où l'enseignante est la source du savoir et conduit les échanges de façon plus ou moins dirigiste, les élèves étant rarement générateurs de questions. L'enseignante fait preuve d'une tutelle plus ou moins stricte (Dumas-Carré & Weil-Barais, 1998), la forme extrême, si l'on peut dire, réduisant les élèves à ne prononcer qu'un mot voire une syllabe (cas de madame Branly). Ces caractéristiques communes pourraient constituer des régularités. Cependant, il est difficile de l'affirmer dans la mesure où l'étude ne porte que sur trois enseignantes et un nombre réduit de séances de classe, mais elles en sont des prémises.

Les éléments de variabilité entre enseignantes sont avérés. Les marges de manœuvre que les enseignantes investissent, se traduisent par une diversité réelle des approches qu'elles conduisent concernant la place du modèle, des observations et l'implication réflexive des élèves, malgré le contexte très contraint d'un programme de classe d'examen. Au sein d'une séance ou d'une séance à l'autre, nous avons relevé des éléments de variabilité consistant en des changements de mode de travail (élève au tableau ou pas, correction écrite au tableau ou pas) ou

en des ajustements effectués pour tenir compte des réactions d'élève, en des consignes supplémentaires ou improvisations.

Comme lors de l'étude précédente (Kermen & Colin, 2014), certains choix s'expliquent en invoquant la part prépondérante d'une composante des pratiques ou au contraire l'imbrication de plusieurs composantes. Malgré un déterminant institutionnel des pratiques central (le programme d'une classe d'examen), l'influence de la composante personnelle (marquée par une perception différente de l'enseignement de la chimie) sur les composantes cognitive et médiative est très forte, puisque nous avons assisté à des séances très différentes. De ce fait nous pouvons esquisser des logiques d'action propres à chacune des enseignantes malgré la brièveté des extraits analysés. Madame Say pour qui la réalisation d'expériences par les élèves est incontournable semble soucieuse de donner une image expérimentale de la chimie, science utilisatrice de modèles. Madame Branly est orientée vers l'accomplissement de la tâche, faire l'expérience et l'exploiter pour répondre rapidement aux questions de la fiche, pour parvenir à traiter tout ce qui a été prévu, l'objectif ultime étant la réussite à l'examen. Madame Forest accorde beaucoup d'importance à la réflexion théorique, et amène les élèves à questionner le rôle d'un modèle (choix de l'équation Partie AII.1.1.2), ce qui la conduit à s'accommoder sans trop de difficulté d'un aléa conjoncturel, la rupture d'approvisionnement du lycée en sulfate de cuivre.

I.3.3. Comparaison de deux séances sur le thème du critère d'évolution

Cette partie présente les éléments permettant d'apprécier les principaux résultats issus de la comparaison de l'activité de deux enseignants, Bud et Dora (madame Forest) qui ont chacun mené une séance visant à introduire le critère d'évolution, en TP. Bud effectue cette séance pour la première fois tandis que Dora a totalement revu la conception de la séance par rapport à ce qu'elle faisait les années antérieures. Tous les deux ont présenté leur projet de séance lors de la deuxième journée du stage de formation, environ un mois avant la mise en œuvre en classe.

I.3.3.1. Les projets de séances

Les deux enseignants ont le même objectif final, induire le critère d'évolution à partir de l'étude de deux mélanges acido-basiques. Bud a préparé une fiche TP en deux parties, où figurent toutes les instructions nécessaires pour réaliser les expériences, les équations de réaction impliquées, et les questions avec de la place pour répondre. Dans la première partie figure la description et la demande d'interprétation de quatre expériences sans aucun calcul, tandis que la deuxième partie consacrée à deux expériences acido-basiques avec mesure de pH comporte un grand nombre de questions impliquant des calculs permettant d'aboutir à la formalisation du critère d'évolution par généralisation. Dora n'a pas prévu de fiche TP et déclare qu'elle a modifié ce qu'elle faisait les années précédentes. Au lieu de partir du critère et de faire quelques mesures suivies de calculs pour le vérifier, il s'agit de l'induire à partir des expériences en émettant des hypothèses et d'une réflexion guidée. Elle utilise exactement les mêmes mélanges (décrits dans Partie AII.1.1.1) que Bud dans sa deuxième partie. Cette partie provient du document d'accompagnement des programmes. Bud en a fait une légère adaptation en ajoutant quelques questions détaillées tandis que Dora a créé de nouvelles tâches pour les élèves comme chercher l'équation de réaction (elle commence par cela, voir Partie AII.1.1.1), prévoir la possibilité d'une transformation chimique et en chercher les raisons, réfléchir sur le rôle des mesures.

Les expériences introductives prévues par Bud ont pour objectif de « voir » le sens dans lequel peut évoluer un système, des évolutions en sens direct ou inverse des équations écrites sont attendues. Cependant cette possibilité déjà connue des élèves, ne permet pas de saisir l'idée centrale du TP, comment déterminer le sens d'évolution si toutes les espèces sont présentes initialement.

1.3.3.2. Comparaison des déroulements

Bud débute sa séance en déclarant « *vous essayez de faire les observations vous pouvez les faire vous-mêmes et on fera les interprétations ensemble okay ?* ». Durant la première partie, il suit un même canevas, les élèves font les expériences en binômes pendant qu'il circule entre les paillasses et veille à la bonne réalisation technique, il fait une mise en commun après chaque expérience où les élèves répondent de façon extrêmement brève, et leur demande de noter la conclusion qu'il dicte. Il ne relie pas les conclusions partielles successives entre elles. À la fin de la cinquième expérience (mesures de pH) l'un des élèves lui demande « *pourquoi ça change pas de couleur ?* », à quoi il répond « *parce que c'était pas la partie ludique du TP* ». La fin de la séance correspond au début des calculs qu'il corrige au tableau.

Dora donne les instructions et informations nécessaires petit à petit oralement. Elle alterne différents modes de travail pendant lesquels les élèves réalisent des tâches de nature différente : réflexion individuelle en silence à deux reprises, réalisation des manipulations, participation à la réflexion collective, écoute. Durant les dialogues collectifs, Dora fait de fréquentes mises au point où elle rappelle l'objectif de la tâche et le résultat de la précédente, elle incite les élèves à faire des propositions argumentées. Pendant le travail en binôme, elle essaie d'obtenir des explications des élèves qu'elle passe voir (par exemple Partie AII.1.1.1). Elle interrompt d'ailleurs l'écriture de l'expression des concentrations devant l'échec des élèves et passe à la réalisation des mélanges.

Les deux séances présentent des caractéristiques communes : les enseignants ne parviennent pas à l'objectif qu'ils s'étaient fixés, les calculs sont inachevés en fin de séance ; les élèves travaillent en binômes, les enseignants passent entre les paillasses, recueillant des informations sur la réalisation des tâches et font quelques ajustements, instruction plus précise ou aide. Les différences proviennent de l'organisation du travail, de la place donnée aux raisonnements des élèves et aux manipulations. Dora prévoit des moments dédiés à la réflexion autonome des élèves, les laisse exprimer leurs idées et fait discuter leur plausibilité durant les phases de dialogue collectif, fournit de fréquents points de repère sur le raisonnement en cours. Bud n'agit pas ainsi, il a passé 1h à la réalisation des manipulations contre 20 min pour Dora, et dicte tout ce qu'il veut que les élèves écrivent alors que Dora les laisse prendre des notes.

Les rôles attribués aux élèves sont différents. Dans la classe de Dora ils sont incités à produire des idées. Exécutants de tâches détaillées dans la séance de Bud, ils n'ont qu'à fournir une brève réponse qui peut se trouver dans la fiche TP. La consigne donnée d'entrée de jeu par Bud précise les rôles de chacun, et révèle une incertitude et un certain manque de confiance à propos de ce que pourraient dire les étudiants. Son manque d'anticipation du comportement des élèves et sa stratégie (procéder par induction plutôt qu'avec hypothèse) indicatrice d'une certaine conception de l'apprentissage, qui ressortissent à sa composante personnelle des pratiques, concourent à une conception de tâches où l'activité cognitive des élèves est peu stimulée.

Le rôle attribué aux manipulations est également différent. Pour Dora, faire les mélanges est nécessaire pour mesurer le pH, et les mesures vont permettre de poursuivre la réflexion pour répondre aux questions qu'elle a initiées. Les manipulations sont un outil au service du raisonnement. La répartie de Bud à l'élève s'interrogeant sur l'absence de changement de couleur est très révélatrice de la conception qu'il a du rôle de l'expérience. Celle-ci doit attirer l'attention des élèves pour les divertir et la réflexion est secondaire. La répartie n'est pas une plaisanterie, puisqu'il ne la fait suivre d'aucune explicitation et qu'il a dit lors du stage vouloir attirer leur attention par des expériences visuelles. Le choix d'une expérience à caractéristique visuelle aurait pu être motivé par l'intention de faire faire aux élèves une prévision, qu'il aurait été facile ensuite de rejeter ou confirmer. D'ailleurs lors du deuxième jour de formation, en écoutant son projet de séance Dora lui avait suggéré de faire ainsi. Mais Bud n'avait aucune

intention d'agir de la sorte (il l'a d'ailleurs dit), montrant ainsi que sa conception du rôle de l'expérience minore l'activité cognitive des élèves et entre en conflit avec les recommandations institutionnelles (le programme) qui préconisent une attitude de questionnement. « *Le « faire » des travaux pratiques, s'il est utile, ne conduit pas nécessairement à une compréhension conceptuelle* » (Tiberghien, 2012, p.119).

La structuration très régulière de la séance de Bud, manipulations en binôme, interprétation majoritairement faite par lui lors d'une mise en commun relevant plus d'un discours à trous (Venturini et al., 2007) que d'un dialogue collectif révèle une composante médiative des pratiques déjà bien stabilisée mais aussi une centration sur la réalisation du projet au détriment d'une attention aux besoins cognitifs des élèves, mais pas à leurs besoins manipulateurs puisqu'il corrige leurs gestes techniques. Cette centration est confirmée dans l'entretien par une description plus fréquente de ses propres perceptions que des actes des élèves.

I.3.3.3. Des logiques d'action contrastées

L'activité de Bud semble principalement orientée par l'atteinte des objectifs suivants : les élèves doivent réaliser avec succès les manipulations prescrites de façon autonome car cela leur sera utile pour l'examen, et avoir des traces écrites correctes des résultats et interprétations. Pour cela il précise les instructions nécessaires à l'accomplissement des manipulations et guide fortement les élèves vers la bonne réponse sans chercher à savoir comment ils raisonnent. La stratégie minimisant la réflexion et les initiatives des élèves révèle une tension entre la composante personnelle et la composante institutionnelle des pratiques, qui est un fait reconnu pour les enseignants débutants (Brickhouse & Bodner, 1992; Sweeney, Bula, & Cornett, 2001).

Bud semble réticent à user d'une stratégie faisant plus de place à l'expression des idées des élèves, ce qui peut être dû à sa conception de l'enseignement de la chimie en salle de TP. Mais conduire une séance pour la première fois avec des contenus disciplinaire et des enjeux qu'il ne maîtrise pas totalement (Kermen, 2015c) représente un tel coût cognitif et émotionnel, qu'il peut ne pas se sentir capable de laisser une plus grande place à l'expression des idées des élèves, qui lui demanderait encore plus d'attention et une décentration qu'il ne pense peut-être pas pouvoir assumer.

L'activité de Dora vise à promouvoir le questionnement des élèves pour accomplir les tâches prescrites. Pour cela elle favorise l'expression individuelle des raisonnements des élèves qu'elle s'efforce d'infléchir, elle maintient périodiquement l'engagement dans la poursuite de la réflexion, l'expérience est un outil au service de la réflexion, sa bonne réalisation technique est secondaire. Lors de l'entretien elle a exprimé plusieurs dilemmes (Wanlin & Crahay, 2012) comme guider les élèves de façon minimale pour qu'ils s'expriment et entrent dans la réflexion ou les guider fortement pour gagner du temps, suivre le raisonnement de tous les élèves ou celui d'un seul. Elle manifeste sa capacité réflexive et révèle une tension entre les composantes cognitive et médiative de ses pratiques, conséquence du risque qu'elle a pris en changeant du tout au tout ce qu'elle faisait les années antérieures.

Dora a assumé sa prise de risque parce qu'elle bénéficie d'un vécu antérieur qui lui permet d'anticiper la gestion pédagogique des réponses d'élèves mais pas nécessairement toute la gestion cognitive, ayant été surprise par la production de Chloé (Partie AII.1.1.1).

I.3.4. Bilan de ces recherches

L'activité des enseignants observés est complexe, cohérente et peut s'expliquer par l'imbrication des composantes des pratiques qui renforcent les choix effectués ou par des tensions entre ces composantes conduisant à des compromis ou des renoncements.

Les logiques d'action mises au jour sont bien contrastées et signalent l'accent sur lequel portent les actes des enseignantes tout en dévoilant les marges de manœuvre investies. D'une année à l'autre, sur deux thèmes, madame Forest (Dora) agit selon les mêmes principes. Sans surprise, l'enseignant débutant agit dans l'immédiateté et manque de repères cognitifs pour apprécier ce qu'il peut attendre et exiger des élèves.

Si on compare le rôle dévolu à l'expérience par les différents enseignants, on peut noter deux positions sur un continuum, l'expérience comme outil au service de, ou prétexte à, la réflexion et l'expérience réalisée pour elle-même sans connexion avec une réflexion théorique. Madame Forest incarnerait la première position extrême, madame Say en serait proche (réfléchir au lieu de se souvenir). Bud incarnerait la seconde position extrême, madame Branly en serait proche (observation déclenchant un savoir-faire théorique).

Rôle de l'expérience

Outil au
service de la
réflexion
théorique

Déconnectée
de la réflexion
théorique



Ces rôles pourraient être mis en lien avec celui donné aux modèles : prédictif et explicatif pour madame Forest, explicatif pour mesdames Say et Branly (justifier l'évolution des systèmes par mise en œuvre du critère), descriptif pour Bud (lier le sens d'évolution sur l'équation aux changements de couleur observés).

Ces aspects ont à voir avec les conceptions ou représentations sur l'enseignement de la chimie elles-mêmes étroitement liées aux conceptions épistémologiques des enseignants, qui appartiennent à la composante personnelle des pratiques. Confirmer ces hypothèses nécessiterait d'autres études et vraisemblablement de compléter par un autre mode d'enquête.

Je termine ce bref bilan par une considération de nature théorique, portant sur un petit élément du cadre de la double approche. Les relations de travail des enseignantes avec les partenaires que sont les préparateurs de chimie auxquels incombent, entre autres, la gestion de l'approvisionnement en produits chimiques et l'installation des salles de TP, ont eu un effet sur les séances de madame Forest (suppression d'une expérience élève) et madame Branly (incident précipité). La mobilisation d'un facteur de la composante sociale de l'activité des enseignantes autre que le milieu social défavorisé des élèves (Butlen, Peltier-Barbier, & Pézard, 2002; Chesnais, 2011) pour rendre compte de l'activité d'un enseignant, légitime le fait d'avoir modifié la composante sociale des pratiques. Ce facteur peut n'avoir qu'une influence très locale, puisqu'un défaut de produits chimiques ne survient pas à chaque séance, cependant madame Branly a argué de dysfonctionnements répétés à chaque séance, influant sur son état d'esprit et par répercussion sur son activité elle-même.

L'autre modification a été apportée à la composante institutionnelle en spécifiant que les ressources comportent aussi le matériel et les produits chimiques. Les dysfonctionnements des multimètres, et l'utilisation de poudre de zinc ou d'une lame de zinc (effet perceptible sur la cinétique de la transformation) ont constitué des éléments de la situation de classe (du milieu) qui ont influé sur l'activité des enseignantes.

I.4. Une incursion du côté des connaissances professionnelles des enseignants

Dans cette partie je rends compte du second axe, encore peu développé, de mes recherches sur les pratiques enseignantes, qui aborde les connaissances professionnelles des enseignants. Dans ce qui précède j'ai cherché à identifier les choix effectués par les enseignants pour faire ce qu'ils font, choix qui renvoient à des décisions prises durant la préparation et la mise en œuvre des projets de séance (Wanlin & Crahay, 2012). Ces décisions dépendent des connaissances de l'enseignant(e), des contraintes et conditions auxquelles il ou elle fait face, et du résultat de ses actions en classe.

La question des connaissances professionnelles de l'enseignant est une question vive dans le champ de la réflexion sur la formation des enseignants, en témoignent les ouvrages qu'elle suscite toujours (par exemple « conflits de savoirs en formation des enseignants » Perrenoud et al, 2008 ; dans l'introduction du livre « les parcours de formation des enseignants débutants » Goigoux et al, 2009, le premier débat abordé concerne la question de la transmission ou de la construction des savoirs professionnels), les articles sur le thème *teacher knowledge*, le retentissement qu'a eu l'article de Shulman (1986) sur la recherche en éducation dans le monde anglo-saxon (Sensevy & Amade-Escot, 2007) avec l'introduction notamment du concept de *pedagogical content knowledge* PCK. Ce concept a généré et génère encore de nombreuses recherches auxquelles sont associés différents modèles. Plusieurs revues de recherche (Abell, 2007; Kind, 2009; Van Driel, Berry, & Meirink, 2014; Van Driel, Verloop, & de Vos, 1998) ont fait un état des connaissances sur ces recherches, et à l'issue d'un numéro spécial de la revue *International Journal of Science Education* consacré aux PCK, Abell (2008) intitulait son article, « 20 ans après, les PCK restent-elles une idée utile ? » pour y répondre positivement bien qu'ayant écrit à propos de sa précédente revue qui concernait un nombre beaucoup plus important d'articles « *La recherche sur les PCK des enseignants de science est une pré-science au sens de Kuhn, les chercheurs ne sont d'accord ni sur la terminologie, ni sur la méthodologie* » (Abell, 2007, p.1134). Un livre consacré aux PCK « *Examining pedagogical content knowledge* » (Gess-Newsome & Lederman, 1999) a constitué une première tentative de mieux ancrer le concept dans le champ de l'enseignement des sciences. Un second « *Re-examining pedagogical content knowledge in science education* » (Berry, Friedrichsen, & Loughran, 2015) a inclus le concept dans un modèle des connaissances et habiletés professionnelles et n'a pas totalement contribué à le clarifier puisque Kind auteure d'une contribution dans le livre conclut par ces mots « *je suis devenue beaucoup plus sceptique et critique à propos des modèles de PCK, mais je vois aussi le besoin de trouver un accord pour avancer dans ce domaine* » (Kind, 2015, p. 193). Elle considère que le modèle de consensus manque de fondements théoriques.

S'intéresser aux connaissances professionnelles et aux PCK signifie entrer dans un champ de recherche toujours en débat au sens où un grand nombre d'éléments de base sont encore en discussion, ce qui implique de préciser ce sur quoi on s'appuie.

I.4.1. Connaissances, croyances, savoirs

Parmi les nombreux aspects qu'un néophyte doit démêler lorsqu'il s'intéresse à ce domaine de recherche, comprendre pourquoi certains auteurs parlent de connaissances et d'autres de savoirs est utile. Une distinction est faite par certains (Laparra & Margolinas, 2010) en référant à la théorie des situations de Brousseau⁴⁰, pour qui une connaissance est « *ce que le sujet met en jeu lorsqu'il investit une situation* » alors qu'un savoir est une « *construction sociale et culturelle* »

⁴⁰ Donc hors du domaine des connaissances des enseignants

qui vit dans une institution, et qui est un texte. Il est dépersonnalisé, décontextualisé, détemporalisé » (p. 146). Pour Tricot (2012) « *tout élément de la mémoire permettant de comprendre le monde et d'agir sur lui, et qui ne nécessite pas de se souvenir de sa propre source* » constitue une connaissance.

Barbier (1996) dans un ouvrage visant à discuter si la distinction entre savoirs théoriques et savoirs d'action est pertinente et fondée, constate au plan épistémologique que la notion de savoir est utilisée pour désigner des énoncés, « savoirs objectivés » ayant une existence distincte de ceux qui les utilisent, ou alors pour désigner des composantes identitaires, « savoirs détenus » indissociables d'un agent individuel ou collectif supposé en être le support, et dont la présence ne peut qu'être « *inférée à partir du constat d'un comportement, d'une pratique, d'une action ou d'un ensemble d'actions* » (p.10). Quel que soit leur statut épistémologique, « *ils paraissent faire l'objet d'une construction sociale* » (Barbier, 1996, p. 10). Dans l'enseignement, il considère que les connaissances sont le résultat d'un processus d'intériorisation, par les individus, d'énoncés qui leur sont extérieurs (p.12).

Rogalski et Veillard (2002) recommandent de faire une différence entre les connaissances mobilisées dans l'activité et le savoir savant tel qu'il apparaît dans les textes de référence (p.53).

Dans une revue des recherches sur les connaissances et croyances des enseignants publiées dans des journaux anglophones qui concentrent la majorité des études sur ce thème, Crahay, Wanlin, Issaieva et Laduron (2011) notent que les différents auteurs utilisent les termes *beliefs* (croyances) et *knowledge* (connaissances) pour parler des ressources cognitives mobilisées par les enseignants et que la frontière entre les deux termes est difficilement identifiable. Les croyances, propres à un individu, qu'ils considèrent être les représentations qu'on trouve dans la littérature francophone sur le sujet, sont à la fois individuelles et sociales, parce que correspondant à l'intériorisation d'éléments partagés par la communauté professionnelle. « *Les connaissances constitueraient un sous-ensemble des croyances, caractérisé par le fait qu'il regroupe des assertions soutenues par des preuves empiriques et une argumentation logique* » (p.87). Ils signalent que les connaissances sont supposées guider l'action pour un grand nombre d'auteurs sans que les preuves soient toujours convaincantes, le lien entre croyances et pratiques n'étant pas avéré.

Pour Tamir (1988) les connaissances professionnelles des enseignants sont constituées de connaissances déclaratives et de connaissances procédurales (qu'il dit être des *skills*) autrement dit des savoir-faire. Vergnaud (2001) distingue deux formes de la connaissance, la forme opératoire qui permet de raisonner et d'agir en fonction de certaines conditions et la forme prédicative, qui consiste à énoncer des relations entre objets ou des propositions. Il s'intéresse à une personne. Dans ce qui suit connaissance concernera une personne, savoir un texte objectivé et socialement construit.

I.4.2. Une brève esquisse de l'évolution du concept PCK

Les premières études sur les pratiques enseignantes l'ont été au sein du paradigme processus-produit, à l'ère béhavioriste (Crahay et al., 2011) et recherchaient des indicateurs de l'efficacité de l'enseignement dans le comportement des maîtres comparé aux apprentissages des élèves, en utilisant des groupes de contrôle pour déterminer l'effet exact de telle ou telle variable (van Driel et al., 2001). Les détracteurs de cette approche béhavioriste, considèrent qu'elle conduit à une vue dépersonnalisée et mécaniste de l'enseignement, ne tenant pas compte du contexte et ne reconnaissant pas du tout sa complexité. L'émergence du courant de la pensée enseignante (*teacher thinking*) est née du besoin d'expliquer pourquoi les enseignants agissaient de telle ou telle manière, et selon Crahay et ses co-auteurs, Shulman en 1986 critique ces recherches qui ne se souciaient pas du contenu enseigné, qu'il qualifie de paradigme manquant. Carlsen (1999) y

voit aussi une raison politique, il s'agissait de montrer qu'il existe des savoirs qui fondent la profession d'enseignant. L'essor des recherches sur les connaissances des enseignants date du début des années 1990 et vise à identifier les connaissances pratiques, les savoirs professionnels des enseignants.

I.4.2.1. La catégorisation des connaissances professionnelles de Shulman

La proposition de Shulman introduit une catégorisation en sept types de connaissances (Tableau 3), dont une totalement nouvelle, les PCK *pedagogical content knowledge*, qu'on traduit généralement par connaissances pédagogiques du contenu et que je désignerai par son acronyme PCK. Les PCK sont « *cet amalgame particulier de contenu et de pédagogie qui est du ressort des seuls enseignants, leur forme particulière de compréhension professionnelle* »⁴¹(Shulman, 1987, p. 8). Il souligne que « *les PCK ont un intérêt particulier parce qu'elles identifient les savoirs spécifiques pour enseigner* »⁴² un contenu donné (Shulman, 1987, p.8). Les caractéristiques clés des PCK mentionnées par Shulman sont les connaissances des différentes représentations du contenu, et la compréhension des conceptions et des difficultés spécifiques d'apprentissage liées à ce contenu (Van Driel, Verloop, et al., 1998). Ces PCK ont pour fonction de transformer un contenu donné en quelque chose d'enseignable (Geddis, 1993).

La première publication autour du concept de *pedagogical content knowledge* PCK que j'ai lue en 2005 fut celle de (Van Driel, Verloop, et al., 1998). Bien que j'aie eu du mal à cerner le concept, dès l'origine il m'a semblé que ces connaissances avaient une parenté affirmée (Kermen, 2007) avec les connaissances professionnelles locales (Morge, 2003), spécifiques d'une séance donnée. Par la suite, Morge (2009) parle des PCK comme de connaissances professionnelles didactiques, spécifiques d'un contenu d'enseignement et non pas seulement d'une discipline, ce qui signifie qu'enseigner l'électricité ne requiert pas les mêmes connaissances professionnelles que pour enseigner la chimie par exemple, et que l'enseignement du concept de transformation chimique au collège et au lycée fait appel à des connaissances professionnelles différentes. Les connaissances professionnelles locales deviennent alors connaissances professionnelles didactiques locales LPCK (Morge, 2009).

La proposition de Shulman a subi des modifications. Abell (2007) rapporte que Grossman considère que les PCK se forment à partir de trois autres types de connaissances : les connaissances disciplinaires CK, les connaissances pédagogiques PK et les connaissances du contexte KofC qui regroupent des connaissances sur les élèves, l'école, les institutions scolaires locales. Van Driel, Verloop et de Vos (1998) examinent cinq modèles de PCK, qui conçoivent celles-ci comme constituées de plusieurs constituants, dont les deux constituants clés de Shulman, tout en reconnaissant qu'il n'y a pas de conceptualisation universellement acceptée des PCK (p.677). Park et Oliver (2008), puis Kind (2009) qui passent en revue respectivement onze et neuf modèles de PCK concluent que les propositions sauf une reprennent les constituants clés de Shulman.

⁴¹ *that special amalgam of content and pedagogy that is uniquely the province of teachers, their own special form of professional understanding .*

⁴² *pedagogical content knowledge is of special interest because it identifies the distinctive bodies of knowledge for teaching*

Tableau 3 : catégories de connaissances professionnelles des enseignants (Shulman, 1987)

| Catégories de Shulman (1987) | Traduction française |
|---|--|
| Content knowledge CK (or subject matter knowledge, SMK), | les connaissances disciplinaires |
| curriculum knowledge, | les connaissances sur les programmes |
| pedagogical content knowledge (PCK), | les connaissances pédagogiques du contenu (PCK) |
| general pedagogical knowledge (PK), | les connaissances pédagogiques générales |
| knowledge of learners and their characteristics, | les connaissances sur les élèves et leurs caractéristiques |
| knowledge of educational context, | les connaissances sur le contexte de l'établissement, de la classe |
| knowledge of educational ends, purposes, and values, and their philosophical and historical backgrounds | les connaissances sur les finalités et les valeurs de l'éducation |

1.4.2.2. Un modèle des PCK

Un des modèles souvent convoqué dans les études portant sur les PCK est le modèle de Magnusson, Krajcik, et Borko (1999) qui considèrent que les PCK ont la même origine que dans la proposition de Grossman. Les PCK sont constituées de cinq composants : le composant orientations de l'enseignement des sciences chapeaute les quatre autres qu'il façonne (Figure 26). Ces quatre composants sont les connaissances sur les stratégies d'enseignement du contenu étudié, les connaissances sur les conceptions et difficultés d'apprentissage des élèves, les connaissances sur les programmes, les connaissances sur l'évaluation du contenu. Abell (2008) fait remarquer que ce modèle est descriptif et non explicatif. Chacun des composants peut être lui-même divisé en plus petits constituants (Padilla & Van Driel, 2011) que Cross (2010) appelle TPC, teacher pedagogical constructions, en référence à la proposition de (Hashweh, 2005).

En effectuant une revue de recherches minutieuse, Friedrichsen, van Driel et Abell (2011) ont noté des utilisations problématiques du composant orientation de l'enseignement des sciences. Ce composant comporte neuf sous-catégories, chacune décrivant une façon d'enseigner supposée reposer sur une conception de l'enseignement de sciences⁴³. Ils ont relevé que l'utilisation des diverses orientations de l'enseignement des sciences était différente ou peu claire selon les études, que les relations entre les orientations et les autres composantes du modèle étaient absentes ou manquant de précision, que l'attribution d'une (celle qui domine) des neuf orientations du modèle à un enseignant alors qu'il peut en changer selon le contexte était discutable et interrogeait l'utilité de cette liste, et finalement ont noté qu'un certain nombre d'études ignoraient totalement ce composant. Ils ont conclu qu'il fallait ne pas tenir compte de ces neuf orientations et revoir ce composant pour lequel ils proposent trois dimensions : croyances sur les buts de l'enseignement des sciences, sur la nature des sciences et sur l'enseignement-apprentissage des sciences.

⁴³ Ils ont aussi critiqué la façon dont ces sous-catégories avaient été constituées.

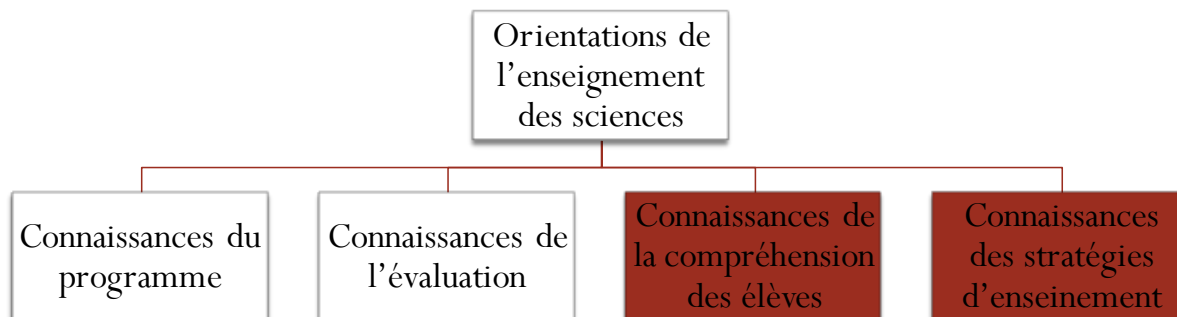


Figure 26 : Constituants des PCK dans le modèle de Magnusson, Krajcik et Borko (1999)

I.4.2.3. Les PCK, des connaissances ou autre chose?

Baxter et Lederman (1999, p.158) définissent les PCK comme « *constituted by what a teacher knows, what a teacher does, and the reasons for the teacher's actions* ». Cette définition lie action, connaissances et raisons. Que sont les raisons? Baxter et Lederman associent les raisons au processus de décision, un concept complexe et difficile à étudier⁴⁴ et mettent en garde « *un enseignant peut avoir tendance à construire des raisons qui paraissent logiques ou correctes au chercheur* » (p. 158). Cette définition étendue signifie qu'une action est sous-tendue par des connaissances et orientée par un but. La connaissance est une source d'action, un facteur qui la rend possible et les raisons expliquent le but à atteindre. Le lien avec l'activité paraît clair mais les auteurs ne font aucune mention d'un tel ancrage théorique.

Explorant les PCK de trois enseignantes expérimentées de chimie pour raffiner le modèle de Magnusson et ses collègues (1999), Park et Oliver (2008) s'appuient sur la proposition de Baxter et Lederman. Ils fournissent une définition qu'ils disent opératoire : « *PCK is **teachers' understanding and enactment** of how to help a group of students understand specific subject matter using multiple instructional strategies, representations, and assessments while working with the contextual, cultural, and social limitations in the learning environment* »⁴⁵ (p.264). Les PCK ne sont plus simplement des connaissances mais plutôt ce que ces connaissances permettent de faire et comment cela entre en jeu dans la classe. Cela constitue un important glissement dans l'approche du concept.

⁴⁴ "complex and slippery construct to study"

⁴⁵ Les PCK sont pour un enseignant la compréhension et la mise en application de la façon d'aider des élèves à comprendre un contenu spécifique en utilisant des stratégies d'enseignement multiples, des représentations, et des évaluations pendant le travail avec des limites contextuelles, culturelles, et sociales dans l'environnement d'apprentissage. Les termes en gras sont soulignés par les auteurs.

À la conférence ESERA 2013, Gess-Newsome donne la définition de consensus obtenue à la suite du sommet tenu en 2012⁴⁶ sur les PCK :

Pedagogical Content Knowledge is defined as a personal attribute of a teacher and is considered both a knowledge base and an action. Our **consensus definition of PCK** is the **knowledge** of, **reasoning** behind, **planning** for, and **enactment** of teaching a particular **topic** in a particular **way** for a particular **reason** to particular **students** for **enhanced student outcomes** (Gess-Newsome, 2013)⁴⁷.

La référence à l'action est présente, mais ne contribue pas à clarifier le concept qui serait tout à la fois une action et une base de connaissances. La mention base de connaissances évoque un appui sur lequel l'action se fonderait, et un caractère dynamique, les PCK seraient adaptables, modifiables, ce qui n'est pas exprimé explicitement. Cependant il me semble qu'il y a une forme de confusion entre le concept, connaissance et ce qu'il permet de faire, ses fonctions : planifier et mettre en application. Dans l'ouvrage écrit à la suite de ce sommet, Gess-Newsome modifie la définition qui devient PCK « *as both a knowledge base used in planning for and the delivery of topic-specific instruction in a very specific classroom context, and as a skill when involved in the act of teaching* » (Gess-Newsome, 2015, p. 30,31). La référence explicite à l'action a disparu et les PCK seraient alors une base de connaissance lors de la préparation et deviendraient une compétence lors de la mise en application du projet de séance. Alonzo et Kim (2015) prennent une position similaire en définissant des PCK dynamiques comme une compétence utilisée en pratique, dans l'action.

Pour Grangeat et Hudson (2015) les compétences d'un enseignant sont la manifestation de leurs connaissances professionnelles dans la classe et doivent donc être différenciées des connaissances. Cross et Lepareur (2015) considèrent qu'il est important de distinguer connaissance, action et le contexte de l'action car ces trois éléments s'influencent réciproquement. Faire une différence entre connaissance et action est également nécessaire car l'émotion peut influencer sur l'action ce qui implique que les connaissances ne sont pas la seule (res)source mentale de l'action. Enfin, les connaissances sont des ressources mentales que le sujet mobilise ou pas, mais ne sont pas un processus cognitif, lequel est une forme d'action mentale. Puisque connaissance et processus cognitif sont distincts alors connaissances et action doivent l'être.

Ces tentatives d'incorporer l'action aux connaissances, suggèrent qu'une approche prenant appui sur la théorie de l'activité⁴⁸ soit légitime et prometteuse.

Inférer des PCK à partir de l'action est une voie de recherche assez récente en France investie selon des cadres théoriques différents, la TACD théorie de l'action conjointe en didactique par David Cross (2010) et la didactique professionnelle par Alain Jameau (2015) ou encore la théorie de l'activité par Michel Grangeat (2015a) qui les étudie pour d'autres disciplines que la physique ou la chimie.

⁴⁶ Séminaire sur invitation ayant réuni 25 chercheurs durant 5 jours à Boulder dans le Colorado, et ayant abouti à un modèle dit de consensus sur les connaissances professionnelles et compétences des enseignants incluant les PCK.

⁴⁷ Les termes en gras sont soulignés par l'auteur.

⁴⁸ L'ouvrage de Michel Grangeat paru également en 2015 discute le « modèle de consensus » en s'appuyant notamment sur la théorie de l'activité.

I.4.3. Reconstituer et inférer des connaissances : une question méthodologique

Durant l'action, des connaissances tacites (non exprimées) sont mobilisées (Rix-Lièvre & Lièvre, 2012; Schön, 1996), Vergnaud (1990) parle de connaissances-en-acte. Ce caractère tacite rend les connaissances très difficiles à révéler. Les actions d'un enseignant peuvent être sous-tendues par une pensée inexprimée ou des raisons informulées. L'analyse de l'action conduit à inférer des connaissances qui ne sont ni exprimées, ni même conscientisées par l'enseignant. Mais une analyse des commentaires de l'enseignant sur ses actions peut fournir des connaissances exprimées.

Le développement des connaissances professionnelles et particulièrement celui des PCK est enraciné dans la pratique (de Jong, 2003; Loughran, Milroy, Berry, Gunstone, & Mulhall, 2001; Van Driel, Verloop, et al., 1998). La réflexion sur la pratique est considérée comme un élément clé du développement des connaissances professionnelles (Corrigan, 2009) mais la réflexion dans l'action est aussi importante (Park & Oliver, 2008; Schön, 1996), bien qu'elle soit inaccessible au chercheur. Il est impossible d'équiper un enseignant en classe d'un micro et de lui demander de penser à voix haute pendant qu'il fait classe. Seules des traces de sa réflexion dans l'action si elle existe sont accessibles à l'observateur.

Ce problème méthodologique est traité différemment selon les chercheurs. Certaines recherches ont utilisé des entretiens détaillés d'enseignants pour dresser une cartographie de leur PCK (Bécu-Robinault, 2007 ; Fernández-Balboa & Stiehl, 1995; Padilla & Van Driel, 2011), d'autres procèdent uniquement à partir de l'observation de l'action (Alonzo, Kobarg, & Seidel, 2012; Cross, 2010), les choix d'inférence sont alors cruciaux, d'autres enfin utilisent à la fois des observations de classe, et des déclarations d'enseignants portant sur leur propre pratique ou non (Jameau, 2015; Loughran et al., 2001; Park & Oliver, 2008).

I.4.4. Double approche et connaissances professionnelles des enseignants

Étant donné la définition des composantes des pratiques, le déterminant que constituent les connaissances professionnelles des enseignants appartient à la composante personnelle des pratiques. Connaître les difficultés précises des élèves à propos de tel ou tel concept et des façons de présenter le savoir pour pallier ces difficultés et apprendre aux élèves à les surmonter fait partie des PCK. Avoir ces connaissances permet une conception de tâches, adaptée ou pas, selon que les difficultés sont prises en compte ou pas. La conception des tâches, le choix de leur nature et de leur succession procèdent de la composante cognitive des pratiques. Si les tâches tiennent compte des difficultés reconnues d'élèves alors on peut considérer que les PCK de la composante personnelle des pratiques ont influé sur la composante cognitive. La composante médiative des pratiques traite de l'organisation du travail en classe et de l'accompagnement procuré par l'enseignant. Ces actes reposent sur des connaissances pédagogiques liées au contenu en jeu (des PCK) mais aussi sur des connaissances pédagogiques plus générales, des PK. Faire travailler des élèves en binômes en TP, relève d'une connaissance pédagogique plus que d'une PCK car ce type d'organisation se retrouve aussi bien pour enseigner l'électricité que la chimie.

Pour identifier de façon relativement claire les connaissances professionnelles mobilisées par les enseignants que j'ai observés, j'ai utilisé le modèle de Magnusson et ses co-auteurs (1999) pour les PCK et celui de Morine-Dershimer & Kent (1999) pour les connaissances pédagogiques PK. Dans ce modèle je n'ai considéré que trois composants, les connaissances des stratégies et modèles d'enseignement (PK-stratégie), les connaissances sur la gestion et l'organisation de la classe (PK-gestion), et les connaissances relatives à la communication et au discours de classe

(PK-discours), considérées par Corrigan (2009) comme devant être maîtrisées par des enseignants débutants pour atteindre les plus hauts niveaux de développement professionnel. Par ailleurs la revue de littérature effectuée par König, Blömeke, Paine, Schmidt, et Hsieh (2011) montre que PK-stratégie et PK-gestion sont les composants clés des connaissances pédagogiques.

Dans le modèle de Magnusson et collègues (1999) les deux constituants clés (en couleur sur la figure 26) sont les connaissances des difficultés et de la compréhension qu'ont les élèves du contenu étudié (PCK-élèves) et les connaissances des stratégies d'enseignement qui permettent aux élèves de comprendre le contenu en question ou de surmonter leurs difficultés (PCK-stratégie).

Pour effectuer une catégorisation cohérente, il est crucial de bien distinguer le composant PK-stratégie du composant PCK-stratégie. PK-stratégie concerne les objectifs de l'enseignant et des connaissances sur la conception des tâches, leur structure et leur diversité sans prendre en compte le contenu. Si ces objectifs et ces tâches s'expriment de la même façon pour un autre cours de chimie ou de physique, alors les connaissances seront considérées comme des PK-stratégie. PCK-stratégie désigne une stratégie spécifiquement dédiée à la compréhension d'un concept précis.

Identifier les connaissances professionnelles dans le cadre de la double approche didactique et ergonomique signifie, mettre le focus (faire un zoom) sur la composante personnelle des pratiques sans pour autant négliger les autres composantes, mais avec le souhait de préciser quelles sont les connaissances qui interviennent lors des choix pris en classe ou en préparation. Plusieurs types de PCK et de PK sont activés à ces occasions (c'est une hypothèse à vrai dire). La conception du projet de séance et des tâches (composante cognitive des pratiques) nécessite de choisir une stratégie pédagogique globale (relevant de PK-stratégie) et repose sur des connaissances disciplinaires (CK), du programme (PCK-programme), des difficultés des élèves (PCK-élèves) et des stratégies adaptées à ces difficultés (PCK-stratégie). La mise en œuvre du projet de séance (composante médiative des pratiques) sollicite des connaissances des stratégies d'enseignement (PK-stratégie), des stratégies spécifiques du contenu (PCK-stratégie), des façons de communiquer (PK-discours) et de gestion de classe (PK-gestion). Les liens qui viennent d'être faits entre les composantes des pratiques sont très schématiquement représentés sur la figure 27.

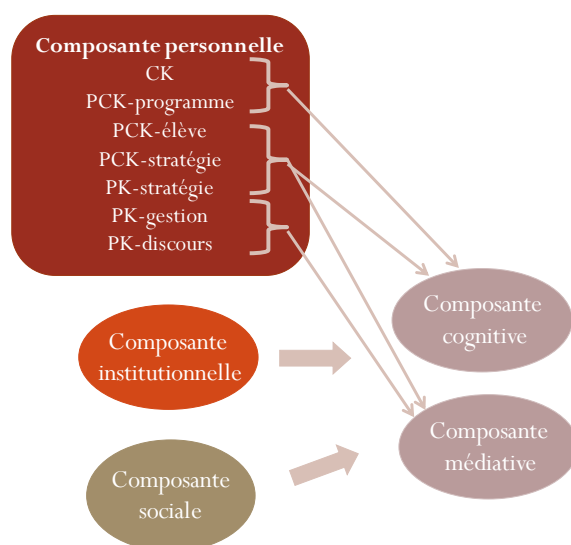


Figure 27 : Particularisation de certains facteurs de la composante personnelle influençant les autres composantes des pratiques

I.4.5. Une étude de cas visant à examiner le lien entre PCK et PK

Dans sa revue des recherches sur les connaissances des enseignants de science, Abell (2007) a sélectionné des articles traitant des connaissances disciplinaires CK, des connaissances pédagogiques du contenu PCK et des connaissances pédagogiques PK. Si la majorité des articles consultés abordent la question des PCK et des CK, peu de recherches étudient les PK des enseignants de science et dans ce cas ne prêtent pas suffisamment attention à l'interaction entre PK et PCK (Abell, 2007, p.1121). Grangeat et Kapelari (2015) soulignent que la revue de recherches faite par Fischer, Borowski et Tepner (2012) aboutit à un constat similaire, les études explorant le lien entre CK, PCK et PK ou la nature des PK manquent. Van Driel, Berry et Meirlink (2014), mettant à jour la revue de littérature d'Abell (2007), notent que les études portant sur les PK des enseignants de science sont rares et ne traitent pas de l'interaction entre CK, PK et PCK. Dans l'examen détaillé que Kind (2009) mène à propos des différents modèles des PCK, elle s'intéresse à la relation entre CK et PCK mais pas à celle entre PK et PCK, qui de fait semble être un point aveugle dans la littérature bien que certains chercheurs considèrent que les PK puissent favoriser le développement des PCK (van Driel, Verloop, et al., 1998 ; Fischer et al., 2012).

Explorer la relation entre les PCK et les PK d'enseignants constituait l'un des objectifs du travail initié par Michel Grangeat lors d'un symposium à la conférence ECER de Porto (2014), qui s'est poursuivi par la tenue d'un séminaire et s'est concrétisé par un livre (Grangeat, 2015b) auquel j'ai contribué (Kermen, 2015c). J'indique les principaux résultats de l'étude que j'ai menée qui concerne l'évolution des systèmes chimiques et l'introduction du critère d'évolution.

Les entretiens antérieurs aux séances de classe ont montré que Dora envisageait plusieurs difficultés possibles pour ses élèves et qu'elle avait repris à son compte une conception connue qui avait été signalée lors du stage, pas d'évolution d'un système si les espèces chimiques sont en quantités égales (Stavridou & Solomonidou, 2000; Tyson, Treagust, & Bucat, 1999). Proposant deux mélanges aux proportions différentes, elle s'attendait à ce que certains élèves disent que le mélange acido-basique où toutes les espèces sont en quantité égale n'évolue pas au contraire de l'autre. Elle fondait « l'intrigue » de sa séance et son développement sur l'envie des élèves de vouloir répondre à cette question, comment savoir quel mélange évolue et pourquoi. Cela impliquait de plus qu'elle laisse une certaine latitude aux élèves pour répondre. Bud s'est contenté d'évoquer les problèmes de mémorisation que pourraient avoir ses élèves.

L'analyse des déroulements des séances, décrits en Partie BI.3.3.2, montre que Dora use d'un répertoire pédagogique plus varié que Bud, ce qui conduit à dire que ses PK sont plus variées que celles de Bud, et qu'elle possède davantage de PCK (PCK-élèves et PCK-stratégie) que lui. De plus la stratégie pédagogique adoptée par Dora, qui favorise l'expression des idées des élèves, lui permet de susciter leur réflexion et améliorer leur compréhension (par exemple interaction avec Lucile), d'améliorer en retour sa propre connaissance de leurs raisonnements (par exemple découverte de l'erreur de Chloé). Le fait de ne pas poursuivre une tâche jusqu'à son complet accomplissement est un indice d'une réflexion dans l'action. Bud aussi a fait preuve de réflexion dans l'action, mais une réflexion non tournée vers la réussite de la séance en elle-même. En effet, les indices de ce type de réflexion sont des digressions temporaires visant à sonder les connaissances des élèves sur un point précis, non essentiel à la poursuite de la séance.

Dans l'entretien face à la vidéo de classe, Bud, qui dit éprouver des difficultés à faire des commentaires, propose néanmoins quelques modifications à apporter qui témoignent de la possession de connaissances pédagogiques (PK-gestion et PK-stratégie). Mais il ne commente pas les difficultés de ses élèves à exprimer des concentrations alors que Dora qui rencontre la même situation, a tenté d'y remédier durant sa séance. Dans l'entretien face à sa vidéo, Dora fait part de dilemmes qui peuvent ressortir de réflexion sur l'action et revient spontanément sur

l'erreur de Chloé pour fournir un argument à opposer au raisonnement sous-tendu, ce qu'elle n'avait pas pu faire durant la séance. Il s'agit typiquement d'un indice d'une réflexion sur l'action qui conduit à l'acquisition d'une nouvelle PCK-stratégie.

Un résultat de cette étude de cas est que l'augmentation des PCK sur le critère d'évolution des systèmes chimiques semble permise par une stratégie pédagogique centrée sur les élèves et dépend de la capacité réflexive de l'enseignant, entre autres⁴⁹. L'expérience d'enseignement est un autre facteur y contribuant (Friedrichsen et al., 2009). Un autre résultat souligne que l'enseignant doit se sentir capable de conduire une telle stratégie, ce qui soulève une question, la perception qu'a un enseignant de sa propre capacité à mener à bien une telle stratégie joue-t-elle un rôle significatif dans l'adoption d'un changement de stratégie ? Une réponse positive serait un élément à ajouter à celui que l'on lit habituellement selon lequel les représentations des enseignants sur l'enseignement de la discipline filtrent (au sens empêcher de mettre en œuvre) la mise en place de stratégies plus centrées sur les élèves. Connaître ces stratégies ne suffit pas, il faut aussi se sentir capable de les conduire et avoir la volonté d'agir, ce qui pose une nouvelle question, comment modifier cette perception ?

I.4.6. Une étude de cas portant sur le développement des PCK lors de deux séances consécutives

Dans l'étude précédente, lors du visionnage de sa vidéo de classe Dora avait souhaité commenter la séance avec le deuxième groupe TP, parce qu'elle n'était « pas satisfaite » de la séance avec le premier groupe selon ses déclarations. Il m'a paru intéressant de déterminer si elle avait effectué des changements entre les deux séances et de creuser les raisons pour lesquelles elle en aurait fait, pour mettre à l'épreuve l'hypothèse selon laquelle d'éventuels changements sont déclenchés par des actions spécifiques d'élèves et par la perception que l'enseignante en a (Chan & Yung, 2015; Park & Oliver, 2008). Plus particulièrement il s'est agi de déterminer si l'analyse d'éventuelles modifications entre les deux séances, supposées reposer sur des PCK et des PK, permettait d'identifier ces connaissances et si des modifications avaient eu pour effet un développement de PCK, de caractériser les conditions de développement (Kermen, 2015a).

La comparaison des deux déroulements est très révélatrice, puisque l'enseignante a supprimé deux tâches et modifié l'ordre et la durée des autres, elle s'est donc livrée à une refonte importante entre les deux séances de TP successives (séparées d'une dizaine de minutes), ce qui indique que ces modifications sont le résultat d'une réflexion dans l'action. Trois cas de prise en compte des actions d'élèves ont été analysés : anticipation d'un raisonnement erroné d'élève, prise en charge d'un raisonnement inattendu ou inconnu, suppression d'une tâche consécutive à une erreur d'élève.

La composante médiative des pratiques de l'enseignante est stable et les stratégies pédagogiques variées mises en œuvre sont sous-tendues par des PK tacites. Les modifications apportées entre les deux séances visent à éviter des incompréhensions aux élèves et à proposer une voie de résolution du problème qui leur soit plus accessible. La nature des tâches assignées aux élèves permet d'inférer les PCK (tacites ou exprimées) de l'enseignante sur le critère d'évolution qui se présentent comme une collection d'unités élémentaires (Hashweh, 2005) dont certaines ne peuvent être utilisées que dans cette séance, ce sont des LPCK (Morge, 2003, 2009).

Trois facteurs favorisant le développement des nouvelles PCK ont été identifiés : une stratégie pédagogique permettant l'expression des raisonnements des élèves, l'identification de

⁴⁹ La structuration de la situation elle-même en fait aussi vraisemblablement partie.

raisonnements erronés ou inattendus d'élèves nécessitant une bonne maîtrise du contenu disciplinaire (Alonzo et al., 2012), la volonté de l'enseignante de démêler les raisonnements d'élèves.

I.4.7. Bilan

Cette étude axée sur une partie des connaissances professionnelles mobilisées par les enseignants pour concevoir et réaliser leurs séances permet de dégager plusieurs constats. La méthodologie de recherche utilisée est appropriée (même si on peut trouver nécessaire d'améliorer la conduite de l'entretien post-séance, par exemple en faisant d'abord visionner la vidéo hors de la présence du chercheur, pour faire choisir les extraits ensuite commentés) puisqu'elle permet d'apprécier la réflexion sur l'action et de conforter certaines inférences émises lors de l'analyse de la vidéo. L'hypothèse d'une connaissance pédagogique ou à tout le moins d'une stratégie pédagogique favorisant l'émission par les élèves de leurs idées, source de développement de PCK est attestée pour l'enseignante expérimentée parce que celle-ci fait aussi preuve de réflexivité. Le rôle différent accordé aux élèves suggère que l'enseignante expérimentée a effectivement comme objectif d'agir sur la relation que les élèves entretiennent avec le savoir en jeu dans la séance, alors que l'enseignant débutant est beaucoup plus centré sur la réalisation des tâches sans essayer de sonder si celle-ci s'accompagne d'une réflexion des élèves qui serait susceptible de conduire à une réorganisation de leurs connaissances. La maîtrise du contenu disciplinaire est aussi un facteur permettant de saisir sur le vif la portée de certains raisonnements ou erreurs d'élèves et d'y apporter un correctif sous la forme d'un argument ou d'une stratégie appropriée.

Ces observations d'enseignants étaient faites dans le cadre d'un stage de formation. Le bilan du stage est décevant dans la mesure où seuls deux enseignants de terminale (dont un débutant) y participaient, ce qui a notoirement réduit la portée des discussions lors de la troisième journée les participants ayant quelques difficultés à saisir les enjeux en classe, ne connaissant pas le détail du programme, ni les difficultés des élèves. Celles-ci avaient bien été présentées lors de la première journée du stage, mais elles n'ont pas suscité d'écho parmi les enseignants n'ayant jamais enseigné ce programme. Au contraire l'enseignante expérimentée a compris la potentialité qu'elle pouvait en tirer pour modifier sa séance de bout en bout. C'est à ce titre que l'expérience d'enseignement est aussi un facteur de développement des PCK.

Le stage de formation n'avait pas pour objectif d'insister sur les stratégies pédagogiques à mettre en œuvre pour enseigner l'évolution des systèmes chimiques puisque, s'adressant à des enseignants de terminale, j'avais supposé que la plupart des participants seraient des enseignants chevronnés, ceux-ci constituant la majorité des enseignants de cette classe, et qu'ils n'auraient pas besoin de ce fait de ce type de considération. Supposition à revoir. Le concept même de ce type de stage est à revoir, car il s'adresse à des enseignants éparpillés dans l'académie, dont certains sont uniquement venus par curiosité au début et n'ont pas suivi l'intégralité de la formation⁵⁰. Des formations sur la durée et s'adressant à un public plus motivé seraient préférables. Envisager des formations d'intérêt local à l'initiative des enseignants d'un établissement ou alors profiter d'un LéA, lieu d'éducation associé, en partenariat avec l'IFé pourraient constituer des alternatives intéressantes. Dans ces conditions, la formation s'inscrit dans la durée, gage d'une meilleure réflexion et prise en compte des enjeux par les différents acteurs, la proximité géographique est aussi un facteur non négligeable de motivation à la

⁵⁰ Le dernier jour, où les participants devaient discuter sur les extraits vidéos de classe, a vu disparaître la moitié des stagiaires.

réflexion et permet la survenue de moments de réflexion hors des réunions, ce qui est susceptible ensuite de faire avancer le projet de formation.

Enfin un autre aspect à améliorer concernant la conception de ce type de formation est l'évaluation de sa portée, de son impact en termes d'amélioration (ou pas) de la compréhension des élèves.

Connaitre les facteurs de développement des PCK (qui sont des connaissances didactiques susceptibles de permettre de proposer un enseignement plus averti des besoins cognitifs des élèves) et des connaissances professionnelles en général, est un élément utile pour concevoir des formations, ce qui constitue un autre motif de poursuivre ce type de recherche, outre celui de mieux connaître les enseignants au travail.

I.5. Perspectives

Mes recherches didactiques sur les pratiques des enseignants de physique-chimie du secondaire en chimie sont encore peu nombreuses et se sont appuyées sur les analyses préalables du savoir à enseigner et de son appropriation par les élèves. Poursuivre mon projet de constituer un éventail de ce type de recherche, sur différents thèmes de chimie, pour caractériser les pratiques, expliciter les savoirs détenus au sein de ce groupe professionnel (Barbier, 1996) (dépeindre le travail des enseignants) nécessite que ces thèmes aient fait l'objet d'analyses préalables ou concomitantes.

Ayant l'intention de développer des recherches sur l'appropriation du concept de liaison chimique, il m'apparaît indispensable d'adjoindre un volet enseignant au volet élève, la didactique comme je l'ai rappelé, étudiant ce qui s'enseigne (les pratiques effectives), ce qui s'apprend (les conceptualisations des élèves) et ce qui peut s'apprendre (le savoir à enseigner) (Orange, 2014).

Un premier projet concernerait les pratiques autour du phénomène de dissolution et des explications proposées en termes de liaison chimique, et viendrait compléter ce que j'ai dit pour le côté élèves. Un autre projet concernerait de la même façon les pratiques autour de la matière colorée. Suivre les mêmes enseignants pour les deux thèmes permettrait de donner corps à la troisième préoccupation que j'exprimais plus haut (Partie AII.4.2), sonder la concordance et la complémentarité des explications fournies permettant une conceptualisation plus vaste de la liaison chimique. La conduite de ces études permettrait de documenter les pratiques effectives des enseignants de physique-chimie en observant ces enseignants sur plusieurs thèmes de chimie (certes voisins), d'aborder la question de leur logique d'action à un niveau plus global que ce que j'ai fait jusqu'à présent (une séance ou deux consécutives) ce qui autoriserait le passage à la qualification de pratiques et non plus seulement d'activité localisée dans le temps et l'espace. Les mêmes données pourraient aussi alimenter l'autre axe de mes recherches sur les pratiques, l'approfondissement des connaissances professionnelles didactiques, les PCK, sur la liaison chimique, qui n'a pas encore été étudié en France.

Un autre champ de recherche est à explorer en France, il s'agit des pratiques des enseignants du supérieur en chimie que j'ai abordées par une étude exploratoire des pratiques déclarées sur l'usage des exemples et des études de cas dans l'enseignement de la chimie à l'université. À cette occasion j'ai observé à travers une entrée pourtant commune, l'utilisation d'exemples, une différence entre les enseignants de chimie organique et les autres. L'exemple en chimie organique aide à la mémorisation de réactions chimiques types, voire de mécanismes réactionnels, alors que ce rôle n'est pas évoqué pour les autres matières en chimie. Cette particularité a déjà été soulignée (Lafarge, Morge, & Méheut, 2014) et semble favorisée par l'usage de l'écriture topologique des formules de molécules qui dessine des motifs qu'il faut

apprendre à repérer (Kermen, 2016b). Mon intérêt exprimé précédemment pour la conceptualisation de la liaison chimique, pourrait trouver un nouveau champ d'étude, celui des pratiques enseignantes autour de la liaison chimique dans le supérieur. Plus précisément il s'agirait d'étudier comment le concept de liaison chimique est invoqué, utilisé dans les cours de chimie organique par rapport à ce qui serait fait dans un cours de chimie générale. Le recours à différents systèmes sémiotiques, et à une présentation plus ou moins théorique ou au contraire prenant appui sur de nombreux exemples pourraient être des facteurs de différenciation de ces pratiques. Un autre facteur pourrait être le public auquel le cours serait destiné : cours général introductif pour des étudiants biologistes par exemple, ou au contraire cours plus spécialisé pour des étudiants de licence de chimie.

Bibliographie

- Abell, S. K. (2007). Research on Science Teacher Knowledge. In S. K. Abell & N. G. Lederman (Éd.), *Handbook of research on science education* (p. 1105-1150). Mahwah, NJ: Lawrence Erlbaum Associates.
- Abell, S. K. (2008). Twenty Years Later: Does pedagogical content knowledge remain a useful idea? *International Journal of Science Education*, 30(10), 1405-1416.
- Adúriz-Bravo, A. (2013). A 'Semantic' View of Scientific Models for Science Education. *Science & Education*, 22(7), 1593-1611.
- Adúriz-Bravo, A., & Izquierdo-Aymerich, M. (2005). Utilising the « 3P-model » to Characterise the Discipline of Didactics of Science. *Science & Education*, 14(1), 29-41.
- Alonzo, A. C., & Kim, J. (2015). Declarative and dynamic pedagogical content knowledge as elicited through two video-based interview methods: PCK through video-based interview methods. *Journal of Research in Science Teaching*. <http://doi.org/10.1002/tea.21271>
- Alonzo, A. C., Kobarg, M., & Seidel, T. (2012). Pedagogical content knowledge as reflected in teacher-student interactions: Analysis of two video cases. *Journal of Research in Science Teaching*, 49(10), 1211-1239.
- Alturkmani, M. D. (2015). *Genèse des affinités disciplinaire et didactique et genèse documentaire : le cas des professeurs de physique-chimie en France* (Sciences de l'Éducation- spécialité didactique de la physique et de la chimie). Université de Lyon, École Normale Supérieure de Lyon.
- Amigues, R. (2003). Pour une approche ergonomique de l'activité enseignante. *Skholê, hors-série 1*, 5-16.
- Bachelard, S. (1979). Quelques aspects historiques des notions de modèle et de justifications des modèles. In P. Delattre & M. Thellier (Éd.), *Elaboration et justification des modèles* (p. 3-19). Paris: Maloine.
- Barberousse, A., Kistler, M., & Ludwig, P. (2000). *La philosophie des sciences au XXe siècle*. Paris: Flammarion.
- Barbier, J.-M. (1996). Introduction. In J.-M. Barbier (Éd.), *Savoirs théoriques et savoirs d'action* (p. 1-17). Paris: Presses Universitaires de France.
- Barlet, R., & Plouin, D. (1994). L'équation-bilan en chimie un concept intégrateur source de difficultés persistantes. *Aster*, (18), 27-56.
- Baxter, J. A., & Lederman, N. G. (1999). Assessment and Measurement of Pedagogical Content Knowledge. In J. Gess-Newsome & N. G. Lederman (Éd.), *Examining Pedagogical Content Knowledge* (p. 147-161). Springer Netherlands.
- Beaufils, D., & Richoux, B. (2003). Un schéma théorique pour situer les activités avec des logiciels de simulation dans l'enseignement de la physique. *Didaskalia*, 23, 9-38.

- Bécu-Robinault, K. (1997). Activités de modélisation des élèves en situation de travaux pratiques traditionnels: introduction expérimentale du concept de puissance. *Didaskalia*, (11), 7-37.
- Bécu-Robinault, K. (2007). Connaissances mobilisées pour préparer un cours de sciences physiques. *Aster*, (45), 165-188.
- Bensaude-Vincent, B. (2005). *Faut-il avoir peur de la chimie?* Paris: Les Empêcheurs de penser en rond/ Le Seuil.
- Ben-Zvi, R., Eylon, B.-S., & Silberstein, J. (1986). Is an atom of copper malleable? *Journal of Chemical Education*, 63(1), 64-66.
- Berry, A., Friedrichsen, P. J., & Loughran, J. (Éd.). (2015). *Re-examining pedagogical content knowledge in science education*. New York: Routledge.
- Braaten, M., & Windschitl, M. (2011). Working toward a stronger conceptualization of scientific explanation for science education. *Science Education*, 95(4), 639-669.
- Brickhouse, N., & Bodner, G. M. (1992). The beginning science teacher: Classroom narratives of convictions and constraints. *Journal of Research in Science Teaching*, 29(5), 471-485.
- Bru, M. (2002). Pratiques enseignantes : des recherches à conforter et à développer. *Revue française de pédagogie*, (138), 63-73.
- Butlen, D., Peltier-Barbier, M.-L., & Pézard, M. (2002). Nommés en REP, comment font-ils ? Pratiques de professeurs d'école enseignant les mathématiques en REF. Contradictions et cohérence. *Revue française de pédagogie*, 140(1), 41-52.
- Calmettes, B. (2010). Analyse pragmatique de pratiques ordinaires, rapport pragmatique à l'enseigner. *Recherches en didactique des sciences et des technologies*, (2), 235-272.
- 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, 452-473.
- Cariou, J.-Y. (2015). Le statut épistémologique de l'expérience dans les nouvelles approches préconisées pour l'enseignement des sciences. *Recherches en didactique des sciences et des technologies*, (12), 59-85.
- Carlsen, W. (1999). Domains of Teacher Knowledge. In J. Gess-Newsome & N. G. Lederman (Éd.), *Examining Pedagogical Content Knowledge* (p. 133-144). Springer Netherlands.
- Chambenois, D., Bromont, F., Collard, É., & Morenas, M.-C. (2003). Réaction chimique et réactions des collégiens. *Bulletin de l'union des physiciens*, 97(850), 121-134.
- Chamizo, J. A. (2013). A New Definition of Models and Modeling in Chemistry's Teaching. *Science & Education*, 22(7), 1613-1632.
- Chan, K. K. H., & Yung, B. H. W. (2015). On-Site Pedagogical Content Knowledge Development. *International Journal of Science Education*, 37(8), 1246-1278.

Chaquin, P., Gutlé, C., & Reinhardt, P. (2014). Liaison(s) chimique(s). Forces ou énergie ? En tout cas, électrostatique ! *l'Actualité chimique*, 384, 29-37.

Chastrette, M., & Dumon, A. (2007). L'image de la chimie est mauvaise. Pourquoi? Que faire? *Didaskalia*, (30), 139-154.

Chesnais, A. (2011). Apprentissages en mathématiques en sixième : contextes différents, pratiques différentes et inégalités. *Revue française de pédagogie*, (176), 57-72.

Chevallard, Y. (1985). *La transposition didactique : du savoir savant au savoir enseigné*. Grenoble: La Pensée Sauvage.

Chomat, A., Larcher, C., & Méheut, M. (1988). Modèle particulière et activités de modélisation en classe de quatrième. *Aster*, (7), 143-184.

Cooper, M. M., & Klymkowsky, M. W. (2013). The Trouble with Chemical Energy: Why Understanding Bond Energies Requires an Interdisciplinary Systems Approach. *CBE-Life Sciences Education*, 12(2), 306-312.

Corrigan, D. (2009). Chemistry teacher education to promote understanding of learning through effective reflective practice. *Chemistry Education Research and Practice*, 10(2), 121-131.

Coulet, J.-C. (2011). La notion de compétence : un modèle pour décrire, évaluer et développer les compétences. *Le travail humain*, Vol. 74(1), 1-30.

Crahay, M., Wanlin, P., Issaieva, É., & Laduron, I. (2011). Fonctions, structuration et évolution des croyances (et connaissances) des enseignants. *Revue française de pédagogie*, n° 172(3), 85-129.

Cross, D. (2010). Action conjointe et connaissances professionnelles de l'enseignant. *Éducation et didactique*, 4(3), 39-60.

Cross, D., & Le Maréchal, J.-F. (2013). Analyse de sujets de devoirs en chimie en classe de terminale : point de vue de la charge cognitive. *Recherches en didactique des sciences et des technologies*, (7), 169-192.

Cross, D., & Lepareur, C. (2015). PCK at stake in teacher-student interaction in relation to students' difficulties. In M. Grangeat (Éd.), *Understanding science teachers' professional knowledge growth* (p. 47-61). Rotterdam, The Netherlands: Sense Publishers.

Davous, D., Dumont, M., Féore, M.-C., Fort, L., Gleize, R., Mauhourat, M.-B., ... Jullien, L. (2003). Les nouveaux programmes de chimie au lycée. *l'Actualité chimique*, (263), 31-44.

Davous, D., Dumont, M., Féore, M.-C., Fort, L., Gleize, R., Mauhourat, M.-B., & Zobiri, T. (2002). À propos des nouveaux programmes en terminale S. Questions/réponses. *Bulletin de l'union des physiciens*, 97(850), 61-70.

Davous, D., Féore, M.-C., Fort, L., Lévêque, T., Mauhourat, M.-B., Perchard, J.-P., & Jullien, L. (1999). Le nouveau programme de la classe de seconde. Transformation chimique d'un système. Le modèle de la réaction chimique. *Bulletin de l'union des physiciens*, 93(817), 1-35 (pages vertes).

de Hosson, C., Doat, T., Kermen, I., & Vézien, J. M. (2012). Designing learning scenarios for a 3D virtual environment: The case of special relativity. *Lat. Am. J. Phys. Educ.* Vol, 6(1), 27-33.

de Hosson, C., Kermen, I., & Parizot, E. (2010). Exploring students' understanding of reference frames and time in Galilean and special relativity. *European Journal of Physics*, 31, 1527-1538.

de Jong, O. (2003). Exploring Science Teachers' Pedagogical Content Knowledge. In D. Psillos, P. Kariotoglou, V. Tselves, E. Hatzikraniotis, G. Fassoulopoulos, & M. Kallery (Éd.), *Science Education Research in the Knowledge-Based Society* (p. 373-381). Springer Netherlands.

Dehon, J., & Snauwaert, P. (2015a). L'équation de réaction : une équation à plusieurs inconnues. Étude de productions d'élèves de 16-17 ans (grade 11) en Belgique francophone. *Recherches en didactique des sciences et des technologies*, (12), 209-235.

Dehon, J., & Snauwaert, P. (2015b). Quelle est la place de l'équation de réaction dans les théories des niveaux de savoir en chimie? In T. Evrard & B. Amory, *Les modèles Des incontournables pour enseigner les sciences: apprendre les sciences de 2 ans 1/2 à 18 ans* (p. 177-192). Louvain-la-Neuve: De Boeck.

Dehon, J., & Snauwaert, P. (2016). Les systèmes sémiotiques en chimie : établissement d'une taxonomie et analyse langagière d'un programme de sciences et de manuels scolaires (grades 7 et 8) (p. 79-84). Présenté à 9e rencontres scientifiques de l'ARDIST. 30,31/3 et 1/4 2016, Lens.

Del Re, G. (2000). Models and analogies in science. *International Journal for Philosophy of Chemistry*, 6(1), 5-15.

Doat, T., Parizot, É., & Vézien, J.-M. (2011). A carom billiard to understand special relativity. In M. Hirose, B. Lok, A. Majumder, & D. Schmalstieg (Éd.), *IEEE Virtual Reality Conference, VR 2011* (p. 201-202).

Drouin, A.-M. (1988). Le modèle en questions. *Aster*, (7), 1-20.

Dumas-Carré, A., & Weil-Barais, A. (1998). *Tutelle et Médiation dans l'enseignement scientifique*. Berne: Peter Lang.

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*.

Duval, R. (1993). Registres de représentation sémiotique et fonctionnement cognitif de la pensée. *Annales de didactique et de sciences cognitives*, (5), 37-65.

Fernández-Balboa, J.-M., & Stiehl, J. (1995). The generic nature of pedagogical content knowledge among college professors. *Teaching and Teacher Education*, 11(3), 293-306.

Fernández-González, M. (2013). Idealization in chemistry: Pure substance and laboratory product. *Science & Education*, 22(7), 1723-1740.

Fischer, H. E., Borowski, A., & Tepner, O. (2012). Professional knowledge of science teachers. In B. J. Fraser, K. Tobin, & C. J. McRobbie (Éd.), *Second International Handbook of Science Education* (p. 435-448). Dordrecht: Springer Netherlands.

Friedman, M. (1974). Explanation and scientific understanding. *The Journal of Philosophy*, 71(1), 5-19.

Friedrichsen, P., Abell, S. K., Pareja, E. M., Brown, P. L., Lankford, D. M., & Volkman, M. J. (2009). Does teaching experience matter? Examining biology teachers' prior knowledge for teaching in an alternative certification program. *Journal of Research in Science Teaching*, 46(4), 357-383.

Friedrichsen, P., van Driel, J. H., & Abell, S. K. (2011). Taking a closer look at science teaching orientations. *Science Education*, 95(2), 358-376.

Ganaras, K. (1998). *La conceptualisation des équilibres chimiques* (Sciences de l'éducation, pédagogie, méthodes éducatives). École normale supérieure de Cachan.

Ganaras, K., & Dumon, A. (2009). Intégration conceptuelle des équilibres acide-base par les étudiants français préparant le CAPES. *Didaskalia*, (35), 59-80.

Geddis, A. N. (1993). Transforming subject-matter knowledge: the role of pedagogical content knowledge in learning to reflect on teaching. *International Journal of Science Education*, 15(6), 673-683.

Gess-Newsome, J. (2013). The PCK summit consensus model and definition of pedagogical content knowledge. In *ESERA2013 conference*. Nicosia, Cyprus.

Gess-Newsome, J. (2015). A model of teacher professional knowledge and skill including PCK: results of the thinking from the PCK Summit. In A. Berry, P. J. Friedrichsen, & J. Loughran (Éd.), *Re-examining pedagogical content knowledge in science education* (p. 28-41). New York: Routledge.

Gess-Newsome, J., & Lederman, N. G. (Éd.). (1999). *Examining pedagogical content knowledge*. Springer Netherlands.

Gilbert, J. K., Boulter, C. J., & Elmer, R. (2000). Positioning Models in Science Education and in Design and Technology Education. In J. K. Gilbert & C. J. Boulter (Éd.), *Developing Models in Science Education* (p. 3-17). Springer Netherlands.

Gilbert, J. K., Boulter, C., & Rutherford, M. (1998). Models in explanations, Part 1: Horses for courses? *International Journal of Science Education*, 20(1), 83-97.

Gilbert, J. K., Pietrocola, M., Zylbersztajn, A., & Franco, C. (2000). Science and Education: Notions of Reality, Theory and Model. In J. K. Gilbert & C. J. Boulter (Éd.), *Developing Models in Science Education* (p. 19-40). Springer Netherlands.

Goffard, M. (1994). Des programmes de chimie à leur mise en oeuvre. *Didaskalia*, (3), 129-137.

Grangeat, M. (2015a). Exploring the set of pedagogical knowledge, from pedagogy to content. In M. Grangeat (Ed.), *Understanding science teachers' professional knowledge growth* (pp. 117-133). Rotterdam, The Netherlands: Sense Publishers.

Grangeat, M. (Éd.). (2015b). *Understanding science teachers' professional knowledge growth*. Rotterdam, The Netherlands: Sense Publishers.

Grangeat, M., & Hudson, B. (2015). A new model for understanding the growth of science teacher professional knowledge. In M. Grangeat (Éd.), *Understanding science teachers' professional knowledge growth* (p. 205-228). Rotterdam, The Netherlands: Sense Publishers.

Grangeat, M., & Kapelari, S. (2015). Introduction: Exploring the growth of science teachers' professional knowledge. In M. Grangeat (Éd.), *Understanding science teachers' professional knowledge growth* (p. 1-9). Rotterdam, The Netherlands: Sense Publishers.

Grosslight, L., Unger, C., Jay, E., & Smith, C. L. (1991). Understanding models and their use in science: Conceptions of middle and high school students and experts. *Journal of Research in Science Teaching*, 28(9), 799-822.

Hacking, I. (1989). *Concevoir et expérimenter*. Paris: Christian Bourgois Éditeur.

Halbwachs, F. (1973). L'histoire de l'explication en physique. In L. Apostel, *L'explication dans les sciences* (p. 72-102). Paris: Flammarion.

Harle, M., & Towns, M. (2011). A Review of Spatial Ability Literature, Its Connection to Chemistry, and Implications for Instruction. *Journal of Chemical Education*, 88(3), 351-360.

Harrison, A. G., & Treagust, D. F. (2000). A typology of school science models. *International Journal of Science Education*, 22(9), 1011-1026.

Harrison, A. G., & Treagust, D. F. (2002). The Particulate Nature of Matter: Challenges in Understanding the Submicroscopic World. In J. K. Gilbert, O. de Jong, R. Justi, D. F. Treagust, & J. H. Van Driel (Éd.), *Chemical Education: Towards Research-based Practice* (Vol. 17, p. 189-212). Dordrecht: Kluwer Academic Publishers.

Hashweh, M. (2005). Teacher pedagogical constructions: a reconfiguration of pedagogical content knowledge. *Teachers and Teaching*, 11, 273-292.

Hempel, C. G., & Oppenheim, P. (1948). Studies in the logic of explanation. *Philosophy of Science*, 15(2), 135-175.

Henn, F., Boiteau, L., & Pépin, F. (2013). Matière, matérialisme et statut du vivant. Entretien avec deux chimistes. In F. Pépin (Éd.), *Les matérialismes et la chimie: perspectives philosophiques, historiques et scientifiques* (p. 143-180). Paris: Éditions matériologiques.

Hiberty, P. C., & Volatron, F. (2003). La théorie de la liaison de valence. *Bulletin de L'union Des Physiciens*, 97(851(2)), 7-28.

Houart, M., Warzée, N., Wouters, J., Reniers, F., & Romainville, M. (2010). La communication pédagogique en cours magistral de chimie. Peut-on améliorer son efficacité? *l'Actualité chimique*, 341, 29-32.

Izquierdo-Aymerich, M., & Adúriz-Bravo, A. (2003). Epistemological Foundations of School Science. *Science & Education*, 12(1), 27-43.

Jacob, C. (2001). Analysis and synthesis. *Hyle*, 7, 31-50.

Jameau, A. (2015). Les connaissances professionnelles des enseignants et leur évolution à travers une analyse de l'activité. Une étude de cas en physique au collège. *Éducation et didactique*, 9(1), 9-31.

Jeannin, L., Veillard, L., & Tiberghien, A. (2010). Appropriation de nouvelles ressources d'enseignement par des professeurs de physique-chimie en seconde. *Recherches en didactique des sciences et des technologies*, (1), 267-292.

Johnson, P. (2000). Children's understanding of substances, part 1: recognizing chemical change. *International Journal of Science Education*, 22(7), 719-737.

Johnson, P. (2002). Children's understanding of substances, Part 2: Explaining chemical change. *International Journal of Science Education*, 24(10), 1037-1054.

Johnstone, A. H. (1993). The development of chemistry teaching: A changing response to changing demand. *Journal of Chemical Education*, 70(9), 701-705.

Johnstone, A. H. (2006). Chemical education research in Glasgow in perspective. *Chemistry Education Research and Practice*, 7, 49-63.

Johsua, S. (1994). Quelques conditions d'évolution d'un objet d'enseignement en physique: l'exemple des circuits électriques. In G. Arzac, Y. Chevillard, J.-L. Martinand, & A. Tiberghien, *La transposition didactique à l'épreuve* (p. 9-34). Grenoble: La Pensée Sauvage.

Johsua, S., & Dupin, J.-J. (1993). *Introduction à la didactique des sciences et des mathématiques*. Paris: Presses Universitaires de France.

Justi, R. S., & Gilbert, J. (2002a). Models and Modelling in Chemical Education. In J. K. Gilbert, O. De Jong, R. S. Justi, D. F. Treagust, & J. H. Driel (Éd.), *Chemical Education: Towards Research-based Practice* (Vol. 17, p. 47-68). Dordrecht, The Netherlands: Kluwer Academic Publishers.

Justi, R. S., & Gilbert, J. K. (2002b). Philosophy of chemistry in university chemical education: The case of models and modelling. *Foundations of Chemistry*, 4(3), 213-240.

Kermen, I. (2007). *Prévoir et expliquer l'évolution des systèmes chimiques* (Didactique des disciplines option didactique des sciences physiques). Université Paris Diderot.

Kermen, I. (2014). Inferring Pedagogical Content Knowledge and Pedagogical Knowledge of two French chemistry Teachers from the Study of their Activity. In *symposium (M. Grangeat) Teacher Professional Knowledge Development: the Linkage between General and Specific Pedagogical Knowledge. ECER 2014. Porto 2-5 september 2014*

Kermen, I. (2015a). A chemistry teacher pedagogical content knowledge development through two lessons. In *symposium (M. Grangeat) Linkage between general pedagogical (PK) and specific pedagogical content knowledge (PCK).ESERA 2015. Helsinki 31.8-4.9.2015 Finland.*

Kermen, I. (2015b). Modéliser, représenter des transformations chimiques. In T. Evrard & B. Amory, *Les modèles Des incontournables pour enseigner les sciences: apprendre les sciences de 2 ans 1/2 à 18 ans* (p. 193-201). Louvain-la-Neuve: De Boeck.

Kermen, I. (2015c). Studying the Activity of Two French Chemistry Teachers to Infer Their Pedagogical Content Knowledge and Their Pedagogical Knowledge. In M. Grangeat (Éd.),

Understanding Science Teachers' Professional Knowledge Growth (p. 89-115). Rotterdam, The Netherlands: Sense Publishers.

Kermen, I. (2016a). Usage et apprentissage des mots en chimie. *l'Actualité chimique*, 407, 34-36.

Kermen, I. (2016b). Utilisation et rôles des exemples lors d'enseignements universitaires de chimie. *Recherches en Éducation*, (27), à paraître.

Kermen, I. (2016c). Utilisation et rôles des exemples lors d'enseignements universitaires de chimie. In *symposium (C. Leininger-Frézal) Cas et exemples dans l'enseignement supérieur : construction d'un questionnaire au prisme des disciplines. Congrès AREF 2016, Mons 4-7 juillet*.

Kermen, I., & Barroso, M. T. (2013). Activité ordinaire d'une enseignante de chimie en classe de terminale. *Recherches en didactique des sciences et des technologies*, (8), 91-114.

Kermen, I., & Colin, P. (2014). Comparaison de l'activité de trois enseignantes lors d'une séance sur les piles en classe de terminale. In *8e rencontres scientifiques de l'Ardist, Marseille* (Vol. 18(2), p. 115-123).

Kermen, I., & Colin, P. (2017). Trois mises en oeuvre d'une transformation chimique pour introduire le thème des piles : des choix didactiques très contrastés. *Éducation et didactique*, à paraître.

Kermen, I., & Méheut, M. (2008). Mise en place d'un nouveau programme à propos de l'évolution des systèmes chimiques : impact sur les connaissances professionnelles d'enseignants. *Didaskalia*, (32), 77-116.

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.

Kermen, I., & Méheut, M. (2011). Grade 12 French Students' use of a Thermodynamic Model for Predicting the Direction of Incomplete Chemical Changes. *International Journal of Science Education*, 33(13), 1745-1773.

Khanfour-Armale, R., & Le Maréchal, J.-F. (2009). Représentations moléculaires et systèmes sémiotiques. *Aster*, (48).

Kind, V. (2009). Pedagogical content knowledge in science education: perspectives and potential for progress. *Studies in Science Education*, 45(2), 169-204.

Kind, V. (2015). On the beauty of knowing then not knowing: pinning down the elusive qualities of PCK. In A. Berry, P. J. Friedrichsen, & J. Loughran (Éd.), *Re-examining pedagogical content knowledge in science education* (p. 178-195). New York: Routledge.

Klein, U. (2001). Paper tools in experimental cultures. *Studies in History and Philosophy of Science Part A*, 32(2), 265-302.

König, J., Blömeke, S., Paine, L., Schmidt, W. H., & Hsieh, F.-J. (2011). General Pedagogical Knowledge of Future Middle School Teachers: On the Complex Ecology of Teacher Education in the United States, Germany, and Taiwan. *Journal of Teacher Education*, 62(2), 188-201.

Lafarge, D. L., Morge, L. M., & Méheut, M. M. (2014). A New Higher Education Curriculum in Organic Chemistry: What Questions Should Be Asked? *Journal of Chemical Education*, 91(2), 173-178.

Laparra, M., & Margolinas, C. (2010). Milieu, connaissance, savoir. Des concepts pour l'analyse de situations d'enseignement. *Pratiques. Linguistique, littérature, didactique*, (145-146), 141-160.

Larcher, C. (1994). étude comparatives de démarches de modélisation. In équipe INRP / LIREST, *Nouveaux regards sur l'enseignement et l'apprentissage de la modélisation en sciences* (p. 9-24). INRP.

Larcher, C., Chomat, A., & Lineatte, C. (1994). D'une représentation à une autre pour modéliser les transformations de la matière au collège. *Aster*, 18, 119-139.

Laugier, A., & Dumon, A. (2000). Travaux pratiques en chimie et représentation de la réaction chimique par l'équation-bilan dans les registres macroscopique et microscopique. Une étude de cas en classe de seconde (15-16 ans). *Chemistry Education Research and Practice*, 1(1), 61-75.

Laugier, A., & Dumon, A. (2003). Obstacles épistémologiques et didactiques à la construction du concept d'élément chimique : quelles convergences ? *Didaskalia*, (22), 69-97.

Le Maréchal, J.-F. (1999a). Design of chemistry labwork activities aiming at teaching basic chemical concepts. In M. Méheut & G. Rebmann (Éd.), *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). Paris : Université Paris 7, LDSP.

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 (Éd.), *Practical work in science education . Recent research studies* (p. 195-209). Roskilde, DK: Roskilde university Press.

Le Maréchal, J.-F., Barbe, E., Roux, M., Jean-Marie, O., Roue, B., & Vincent, D. (2004). Difficulté des élèves sur l'utilisation des ions dans le cadre des nouveaux programmes. *Bulletin de l'union des physiciens*, 98(867), 1399-1408.

Le Maréchal, J.-F., & Bécu-Robinault, K. (2006). La simulation en chimie au sein du projet Microméga®. *Aster*, 43, 81-108.

Le Maréchal, J.-F., & Cross, D. (2010). Difficultés d'apprentissage liées aux représentations en chimie. *Bulletin de l'union des physiciens*, 104(928), 1025-1035.

Leplat, J., & Hoc, J.-M. (1983). Tâche et activité dans l'analyse psychologique des situations. *Cahiers de psychologie cognitive*, 3(1), 49-63.

Levy Nahum, T., Mamlok-Naaman, R., Hofstein, A., & Taber, K. S. (2010). Teaching and learning the concept of chemical bonding. *Studies in Science Education*, 46(2), 179-207.

Loughran, J., Milroy, P., Berry, A., Gunstone, R., & Mulhall, P. (2001). Documenting Science Teachers' Pedagogical Content Knowledge Through PaP-eRs. *Research in Science Education*, 31(2), 289-307.

Magnusson, S., Krajcik, J., & Borko, H. (1999). Nature, Sources, and Development of Pedagogical Content Knowledge for Science Teaching. In J. Gess-Newsome & N. G. Lederman (Éd.), *Examining Pedagogical Content Knowledge* (p. 95-132). Springer Netherlands.

Maisch, C., de Hosson, C., & Kermen, I. (2012). Étude exploratoire d'un scénario d'utilisation pour un environnement virtuel en 3D dans le cas de la relativité restreinte. In *Septième journées scientifiques de l'ARDIST. Bordeaux, 14-16 mars 2012* (p. 261-269).

Maisch, C., Kermen, I., Hosson, C. de, & Parizot, É. (2015). Utiliser une simulation vidéo 3D pour approcher les concepts de la cinématique relativiste : étude de cas. *Recherches en didactique des sciences et des technologies*, (12), 141-174.

Mangane, D., & Kermen, I. (2016). Un aspect des difficultés des élèves Béninois en stéréochimie: la visualisation mentale des représentations sémiotiques de Cram et de Newman. *Recherches en Didactiques*, 22, à paraître.

Markic, S., & Childs, P. E. (2016). Language and the teaching and learning of chemistry. *Chem. Educ. Res. Pract.*, 17(3), 434-438.

Martinand, J.-L. (1986). *Connaitre et transformer la matière : des objectifs pour l'initiation aux sciences et techniques*. Berne: Peter Lang.

Martinand, J.-L. (1992). Présentation. In équipe INRP / LIREST, *Enseignement et apprentissage de la modélisation en sciences*. INRP.

Martinand, J.-L. (1998). Introduction à la modélisation. In *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, Actes de l'université d'été*. INRP-ENS Cachan. Consulté à l'adresse <http://www.inrp.fr/Tecne/Rencontre/Univete/Tic/Pdf/Modelisa.pdf>

Martinand, J.-L. (2002). Apprendre à modéliser. In R. Toussaint (Éd.), *Changement conceptuel et apprentissage des sciences : recherches et pratiques*. (p. 47-68). Outremont, Québec: Logiques.

Martinand, J.-L. (2014). Point de vue : Didactique des sciences et techniques, didactique du curriculum. *Éducation et didactique*, 8(1), 65-76.

Méheut, M. (1989). Des représentations des élèves au concept de réaction chimique : premières étapes. *Bulletin de l'union des physiciens*, 83(716), 997-1011.

Morge, L. (2003). Les connaissances professionnelles locales: le cas d'une séance sur le modèle particulaire. *Didaskalia*, (23), 101-131.

Morge, L. (2007). Comparaison des conceptions épistémologiques à l'oeuvre dans les anciens et les nouveaux programmes de collège sur le thème du modèle particulaire. *Bulletin de l'union des physiciens*, 101(890), 23-30.

Morge, L. (2009). La simulation croisée pour accéder aux connaissances professionnelles didactiques locales (LPCK) acquises par l'expérience. In *Sixième journées scientifiques de l'ARDiST - Nantes, 14-16 octobre 2009*.

Morge, L., & Doly, A.-M. (2013). L'enseignement de la notion de modèle. Quels modèles pour faire comprendre la distinction entre modèle et réalité ? *Spirale*, (52), 149-175.

Morine-Dershimer, G., & Kent, T. (1999). The Complex Nature and Sources of Teachers' Pedagogical Knowledge. In J. Gess-Newsome & N. G. Lederman (Éd.), *Examining Pedagogical Content Knowledge* (p. 21-50). Springer Netherlands.

Mzoughi-Khadhraoui, I., & Dumon, A. (2012). L'appropriation par des élèves tunisiens débutants du langage permettant de représenter la réaction chimique. *Recherches en didactique des sciences et des technologies*, (6), 89-118.

Négrier, M., & Kermen, I. (2011). Quelle adéquation entre intentions didactiques d'un programme de chimie et des manuels scolaires ? *Recherches en didactique des sciences et des technologies*, (4), 163-194.

Ney, M. (2006). Une typologie des fonctions des modèles formels : l'exemple de la biologie. *Aster*, 43, 133-162.

Orange, C. (1994). Les modèles, de la mise en relation au fonctionnement. In équipe INRP / LIREST, *Nouveaux regards sur l'enseignement et l'apprentissage de la modélisation en sciences* (p. 25-43). INRP.

Orange, C. (2014). Regard complémentaire - Unité et diversité du didactique. *Éducation et didactique*, 8(1), 85-90.

Österlund, L.-L., Berg, A., & Ekborg, M. (2010). Redox models in chemistry textbooks for the upper secondary school: friend or foe? *Chemistry Education Research and Practice*, 11(3), 182-192.

Padilla, K., & Van Driel, J. (2011). The relationships between PCK components: the case of quantum chemistry professors. *Chemistry Education Research and Practice*, 12(3), 367-378.

Paquay, L., & Sirota, R. (2001). La construction d'un espace discursif en éducation. Mise en oeuvre et diffusion d'un modèle de formation des enseignants : le praticien réflexif. *Recherche et formation*, (36), 5-15.

Park, S., & Oliver, J. S. (2008). Revisiting the Conceptualisation of Pedagogical Content Knowledge (PCK): PCK as a Conceptual Tool to Understand Teachers as Professionals. *Research in Science Education*, 38(3), 261-284.

Pastré, P. (2007). Quelques réflexions sur l'organisation de l'activité enseignante. *Recherche et formation*, (56), 81-93.

Pekdag, 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. In *Deuxièmes Rencontres Scientifiques de l'ARDIST, Carry-le -Rouet* (Vol. SKHOLE numéro hors série, p. 129-141).

Pekdag, B., & Le Maréchal, J.-F. (2006). Influence de la nature du texte d'un film de chimie sur son utilisation par un apprenant. *Didaskalia*, (28), 55-84.

Pélissier, L., & Venturini, P. (2016). Analyse praxéologique de l'enseignement de l'épistémologie de la physique : le cas de la notion de modèle. *Éducation & didactique*, 10(2), 63-90.

Portides, D. P. (2007). The Relation between Idealisation and Approximation in Scientific Model Construction. *Science & Education*, 16(7-8), 699-724.

Reuter, Y. (2007). La conscience disciplinaire. *Éducation et didactique*, 1(2), 55-71.

Rix-Lièvre, G., & Lièvre, P. (2012). La dimension « tacite » des connaissances expérientielles individuelles : une mise en perspective théorique et méthodologique. *Management international*, 16, 21-28.

Robardet, G., & Guillaud, J.-C. (1997). *Éléments de didactique des sciences physiques*. Paris: Presses Universitaires de France.

Robert, A. (1999). Recherches didactiques sur la formation professionnelle des enseignants de mathématiques du second degré et leurs pratiques en classe. *Didaskalia*, (15), 123-157.

Robert, A. (2004). Que cherchons-nous à comprendre dans les pratiques des enseignants? In M.-L. Peltier-Barbier, *Dur d'enseigner en ZEP: analyse des pratiques de professeurs des écoles enseignant les mathématiques en Réseaux d'éducation prioritaire* (p. 15-32). Grenoble: La Pensée Sauvage.

Robert, A. (2008a). La double approche didactique et ergonomique pour l'analyse des pratiques d'enseignants de mathématiques. In F. Vandebrouck (Éd.), *La classe de mathématiques : activités des élèves et pratiques des enseignants* (p. 59-68). Toulouse: Octarès Editions.

Robert, A. (2008b). Sur les apprentissages des élèves : une problématique inscrite dans les théories de l'activité et du développement. In F. Vandebrouck (Éd.), *La classe de mathématiques : activités des élèves et pratiques des enseignants* (p. 33-44). Toulouse: Octarès Editions.

Robert, A. (2012). Méthodes d'analyse des pratiques d'enseignants de mathématiques du second degré. In *Actes du colloque Les méthodes d'analyse des pratiques d'enseignement : un regard comparatif. XVIIe congrès mondial AMSE, recherche en éducation et en formation : enjeux et défis aujourd'hui, 8 juin 2012*, Reims : université de Reims.

Robert, A., & Rogalski, J. (2002). Le système complexe et cohérent des pratiques des enseignants de mathématiques: Une double approche. *Canadian Journal of Science, Mathematics and Technology Education*, 2(4), 505-528.

Robert, A., & Vivier, L. (2013). Analyser des vidéos sur les pratiques des enseignants du second degré en mathématiques: des utilisations contrastées en recherche en didactique et en formation de formateurs – quelle transposition ? *Éducation et didactique*, 7(2), 115-144.

Rogalski, J. (2003). Y a-t-il un pilote dans la classe ? Une analyse de l'activité de l'enseignant comme gestion d'un environnement dynamique ouvert. *Recherches en didactique des mathématiques*, 23(3), 343-388.

Rogalski, J., & Veillard, L. (2002). Articulation entre différents types de connaissances. In A. Tiberghien (Éd.), *Des connaissances naïves au savoir scientifique* (p. 51-79). Consulté à l'adresse <https://halshs.archives-ouvertes.fr/edutice-00000285/document>

- Schön, D. A. (1996). A la recherche d'une nouvelle épistémologie de la pratique et de ce qu'elle implique pour les adultes. In J.-M. Barbier (Éd.), *Savoirs théoriques et savoirs d'action* (p. 201-222). Paris: Presses Universitaires de France.
- Schwarz, C. V., Reiser, B. J., Davis, E. A., Kenyon, L., Achér, A., Fortus, D., ... Krajcik, J. (2009). Developing a learning progression for scientific modeling: Making scientific modeling accessible and meaningful for learners. *Journal of Research in Science Teaching*, 46(6), 632-654.
- Sensevy, G., & Amade-Escot, C. (2007). Une présentation de « Those who understand: Knowledge Growth in Teaching ». *Éducation et didactique*, 1(1), 95-96.
- Sensevy, G., & Santini, J. (2006). Modélisation : une approche épistémologique. *Aster*, 43, 163-188.
- Shulman, L. S. (1987). Knowledge and Teaching Foundations of the New Reform. *Harvard Educational Review*, 57(1), 1-23.
- Sinaceur, H. (1999). Modèle. In *Dictionnaire d'histoire et philosophie des sciences* (p. 649-651). Paris, France: PUF.
- Soler, L. (2000). *Introduction à l'épistémologie*. Paris: Ellipses.
- Soler, L. (2013). Qu'est-ce qu'un modèle scientifique? *Spirale*, (52), 177-214.
- Stavridou, H., & Solomonidou, C. (1989). Physical phenomena--chemical phenomena: do pupils make the distinction? *International Journal of Science Education*, 11(1), 83-92.
- Stavridou, H., & Solomonidou, C. (2000). Représentations et conceptions des élèves grecs par rapport au concept d'équilibre chimique. *Didaskalia*, (16), 107-134.
- Stieff, M., Hegarty, M., & Dixon, B. (2010). Alternative Strategies for Spatial Reasoning with Diagrams. In A. K. Goel, M. Jamnik, & N. H. Narayanan (Éd.), *Diagrammatic Representation and Inference* (p. 115-127). Springer Berlin Heidelberg.
- Stieff, M., & Raje, S. (2010). Expert Algorithmic and Imagistic Problem Solving Strategies in Advanced Chemistry. *Spatial Cognition & Computation*, 10(1), 53-81.
- Sweeney, A. E., Bula, O. A., & Cornett, J. W. (2001). The role of personal practice theories in the professional development of a beginning high school chemistry teacher. *Journal of Research in Science Teaching*, 38(4), 408-441.
- 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.
- Talanquer, V. (2011). Macro, Submicro, and Symbolic: The many faces of the chemistry « triplet ». *International Journal of Science Education*, 33(2), 179-195.
- Tamir, P. (1988). Subject matter and related pedagogical knowledge in teacher education. *Teaching and Teacher Education*, 4(2), 99-110.

- Tiberghien, A. (1994). Modeling as a basis for analyzing teaching-learning situations. *Learning and Instruction*, 4(1), 71-87.
- Tiberghien, A. (1999). Labwork activity and learning physics-an approach based on modelling. In J. Leach & A. C. Paulsen (Éd.), *Practical work in science education . Recent research studies* (p. 176-194). Roskilde, DK: Roskilde university Press.
- Tiberghien, A. (2000). Designing teaching situations in the secondary school. In R. Millar, J. Leach, & J. Osborne (Éd.), *Towards research-based design of teaching situations in physics at the secondary school level* (p. 27-47). Buckingham, UK: Open University Press.
- Tiberghien, A. (2012). Analyse d'une séance de physique en seconde : quelle continuité dans les pratiques ? *Éducation et didactique*, 6(3), 97-123.
- Tiberghien, A. (2014). Séminaire du LDAR organisé par le groupe "pratiques".
- Tiberghien, A., Psillos, D., & Koumaras, P. (1994). Physics instruction from epistemological and didactical bases. *Instructional Science*, 22(6), 423-444.
- 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.
- Tiberghien, A., Vince, J., & Gaidioz, P. (2009). Design-based Research: Case of a teaching sequence on mechanics. *International Journal of Science Education*, 31(17), 2275-2314.
- Tiercelin, C. (1999). Réalisme. In *Dictionnaire d'histoire et philosophie des sciences* (p. 802-806). Paris, France: PUF.
- Toulmin, S. (1973). *L'explication scientifique*. Paris, France: Armand Colin.
- Toussaint, J. (1995). La physique et son enseignement. In M. Develay, *Savoirs scolaires et didactiques des disciplines. une encyclopédie pour aujourd'hui* (p. 295-315). Paris: ESF éditeur.
- Treagust, D. F., Chittleborough, G., & Mamiala, T. L. (2002). Students' understanding of the role of scientific models in learning science. *International Journal of Science Education*, 24(4), 357-368.
- Tricot, A. (2012). Utilité, apprentissages et enseignement : une approche évolutionniste. In *Du mot au concept : utilité* (p. 99-116). Grenoble: Presses Universitaires de Grenoble.
- Tsaparlis, G. (2003). Chemical phenomena versus chemical reactions: do students make the connection? *Chemistry Education Research and Practice*, 4, 31-43.
- Tyson, L., Treagust, D. F., & Bucat, R. B. (1999). The Complexity of Teaching and Learning Chemical Equilibrium. *Journal of Chemical Education*, 76(4), 554.
- van Driel, J. H., Beijaard, D., & Verloop, N. (2001). Professional development and reform in science education: The role of teachers' practical knowledge. *Journal of Research in Science Teaching*, 38(2), 137-158.

- Van Driel, J. H., Berry, A., & Meirink, J. (2014). Research on Science teacher knowledge. In N. G. Lederman & S. K. Abell, *Handbook of Research on Science Education, Volume II* (p. 848-870). London: Routledge.
- 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.
- Van Driel, J. H., Verloop, N., & de Vos, W. (1998). Developing science teachers' pedagogical content knowledge. *Journal of Research in Science Teaching*, 35(6), 673-695.
- Vandebrouck, F. (2008). *La classe de mathématiques: activités des élèves et pratiques des enseignants*. Toulouse: Octarès Editions.
- Varenne, F. (2013). *Théorie, réalité, modèle*. Paris: éditions matériologiques.
- Venturini, P., Calmettes, B., Amade-Escot, C., & Terrisse, A. (2007). Analyse didactique des pratiques d'enseignement de la physique d'une professeure expérimentée. *Aster*, (45), 211-234.
- Venturini, P., & Tiberghien, A. (2012). La démarche d'investigation dans le cadre des nouveaux programmes de sciences physiques et chimiques : étude de cas au collège. *Revue française de pédagogie*, n° 180(3), 95-120.
- Vergnaud, G. (1990). La théorie des champs conceptuels. *Recherches en didactique des mathématiques*, 10(2.3), 133-170.
- Vergnaud, G. (2001). Forme opératoire et forme prédicative de la connaissance (Operative and predicative forms of knowledge). *Investigações em Ensino de Ciências*, 17(2), 287-304.
- Vérillon, P. (1996). Approches psychologiques et didactiques en technologie: l'exemple du dessin technique. *Aster*, 22, 127-147.
- Vieira, R. D., & Kelly, G. J. (2014). Multi-level Discourse Analysis in a Physics Teaching Methods Course from the Psychological Perspective of Activity Theory. *International Journal of Science Education*, 36(16), 2694-2718.
- Vygotski, L. (1997). *Pensée et langage*. Paris: La Dispute.
- Walliser, B. (1977). *Systèmes et modèles*. Paris: éditions du seuil.
- Wanlin, P., & Crahay, M. (2012). La pensée des enseignants pendant l'interaction en classe. Une revue de la littérature anglophone. *Éducation & didactique*, vol.6(1), 9-46.