Mise en place d'un nouveau programme à propos de l'évolution des systèmes chimiques : impact sur les connaissances professionnelles d'enseignants

Isabelle Kermen, Martine Méheut

▶ **To cite this version:**

Isabelle Kermen, Martine Méheut. Mise en place d'un nouveau programme à propos de l'évolution des systèmes chimiques : impact sur les connaissances professionnelles d'enseignants. Didaskalia (Paris), 2008, 32, pp.77-116. ⟨10.4267/2042/23981⟩. ⟨hal-01742671⟩

HAL Id: hal-01742671

https://hal.science/hal-01742671v1

Submitted on 23 May 2025

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

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

Distributed under a Creative Commons CC BY-NC-ND 4.0 - Attribution - Non-commercial use - No Derivative Works - International License

Didaskalia

Mise en place d'un nouveau programme à propos de l'évolution des systèmes chimiques : impact sur les connaissances professionnelles d'enseignants / Implementation of a new curriculum on the evolution of chemical systems in grade 12 : impact on teachers' professional knowledge

Isabelle Autain Kermen, Martine Méheut

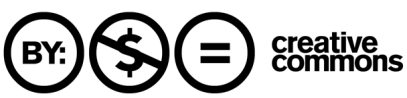
Citer ce document / Cite this document :

Autain Kermen Isabelle, Méheut Martine. Mise en place d'un nouveau programme à propos de l'évolution des systèmes chimiques : impact sur les connaissances professionnelles d'enseignants / Implementation of a new curriculum on the evolution of chemical systems in grade 12 : impact on teachers' professional knowledge. In: Didaskalia, n°32, 2008. pp. 77-116;

doi : 10.4267/2042/23981

https://www.persee.fr/doc/didas_1250-0739_2008_num_32_1_1228

Fichier pdf généré le 02/03/2022



Resumen

Evaluación del impacto de un nuevo programa sobre los conocimientos profesionales de docentes de Bachillerato francés opcion cientifica a propósito de la evolución de los sistemas químicos

Este artículo estudia el impacto de la puesta en práctica de un nuevo programa de Química en clase de 2° de Bachillerato opción científica (grado 12) sobre los conocimientos profesionales de docentes. Determinamos, con ayuda de entrevistas semi-directivas con docentes en ejercicio, su conocimiento del contenido de enseñanza (la evolución de los sistemas químicos) de lo que está en juego en el programa (traducción de las intenciones didácticas de los autores del programa) y de las dificultades de los alumnos. La introducción de la evolución de los sistemas químicos y la del criterio de evolución son percibidas efectivamente como lo que está en juego en este programa al contrario de otros dos temas (transformación y reacción químicas, equilibrio químico y modelos). La presentación de respuestas de alumnos en las entrevistas puede actuar como revelador de las dificultades de los docentes. Al contrario, cuando se trata de contenidos que los docentes dominan, esta presentación contribuye al desarrollo de sus conocimientos profesionales, dándoles la ocasión de identificar errores de alumnos que no habrían descubierto antes.

Abstract

Implementation of a new curriculum on the evolution of chemical systems in grade 12 : impact on teachers' professional knowledge

This article sets out a study of the impact of the implementation of a new chemistry curriculum in grade 12 on teachers' professional knowledge. In-service teachers' semi-structured interviews were made to determine their knowledge of the subject matter content (evolution of chemical systems), their knowledge of curriculum issues and their knowledge of the students' learning difficulties. The introduction of the evolution of chemical systems and that of the evolution criterion are perceived as an issue of this curriculum whereas two other themes of this programme, chemical changes and chemical reactions, and chemical equilibrium and models are not. The presentation of students' authentic responses may reveal some teachers' conceptual difficulties. On the contrary if they have the mastery of the subject matter, it helps them to develop their professional knowledge by giving them the opportunity to identify errors made by some students which they had not previously detected.

Résumé

Cet article étudie l'impact de la mise en place d'un nouveau programme de chimie en classe de terminale S (grade 12), sur les connaissances professionnelles d'enseignants. Nous déterminons, au moyen d'entretiens, leur connaissance du contenu à enseigner (l'évolution des systèmes chimiques), des enjeux du programme (traduction des intentions didactiques des auteurs du programme) et des difficultés des élèves. L'introduction de l'évolution des systèmes chimiques et celle du critère d'évolution sont bien ressenties comme des enjeux de ce programme au contraire de deux autres thèmes (transformation et réaction chimiques, équilibre chimique et modèles). Il apparaît que la présentation de réponses d'élèves lors des entretiens peut agir comme révélateur des difficultés des enseignants. Au contraire lorsqu'il s'agit de contenus que les enseignants maîtrisent, cette présentation peut contribuer au développement de leurs connaissances professionnelles en leur donnant l'occasion d'identifier des erreurs d'élèves qu'ils n'avaient pas repérées auparavant.

Zusammenfassung

Bewertung eines neuen Lehrplans über die Entwicklung der chemischen Système in der 12. Klasse : Einfluss über die beruflichen Kenntnisse der Lehrer

Dieser Artikel beobachtet die Einführung eines neuen Lehrplans in Chemie in der 12 Klasse und seinen Einfluss über die beruflichen Kenntnisse der Lehrer. Gespräche mit amtierenden Lehrern wurden geführt, um folgende Punkte zu bestimmen : Kenntnisse über den zu unterrichtenden Stoff (die Entwicklung der chemischen Système), über die Schwerpunkte des Lehrplans (Umsetzung der didaktischen Absichten der Lehrplanverfasser), Schwierigkeiten der Schüler. Die Einführung der Entwicklung der chemischen Système und des Entwicklungskhterium werden tatsächlich als ein

Schwerpunkt dieses Lehrplans empfunden, im Gegensatz zu den beiden anderen Themen (chemische Verwandlung und chemische Reaktion, chemisches Gleichgewicht und Modelle). Die Vorstellung von Schülerantworten bei den Gesprächen kann die Schwierigkeiten der Lehrer aufdecken. Im Gegenteil, wenn es sich um Lernstoffe handelt, die die Lehrer beherrschen, trägt diese Vorstellung zur Entwicklung ihrer beruflichen Kenntnisse bei, weil sie ihnen ermöglicht, Schülerschwierigkeit zu entdecken, die sie vorher nicht gesehen hatten.

BY: $ = creative commons

Mise en place d'un nouveau programme à propos de l'évolution des systèmes chimiques : impact sur les connaissances professionnelles d'enseignants

Implementation of a new curriculum on the evolution of chemical systems in grade 12: impact on teachers' professional knowledge

Evaluación del impacto de un nuevo programa sobre los conocimientos profesionales de docentes de Bachillerato francés opción científica a propósito de la evolución de los sistemas químicos

Bewertung eines neuen Lehrplans über die Entwicklung der chemischen Systeme in der 12. Klasse : Einfluss über die beruflichen Kenntnisse der Lehrer

Isabelle KERMEN

LDSP, université Paris-Diderot–Paris 7, case 7086, 75205 Paris cedex 13, France.
Université d'Artois, faculté Jean-Perrin, rue Jean-Souvraz, SP 18, 62307 Lens cedex, France.
isabelle.kermen@univ-artois.fr

Martine MÉHEUT

LDSP, université Paris Diderot–Paris 7, case 7086, 75205 Paris cedex 13, France.
IUFM de Créteil, université Paris-Val-de-Marne-Paris 12

Persée creative commons

Résumé

Cet article étudie l'impact de la mise en place d'un nouveau programme de chimie en classe de terminale S (grade 12), sur les connaissances professionnelles d'enseignants. Nous déterminons, au moyen d'entretiens, leur connaissance du contenu à enseigner (l'évolution des systèmes chimiques), des enjeux du programme (traduction des intentions didactiques des auteurs du programme) et des difficultés des élèves. L'introduction de l'évolution des systèmes chimiques et celle du critère d'évolution sont bien ressenties comme des enjeux de ce programme au contraire de deux autres thèmes (transformation et réaction chimiques, équilibre chimique et modèles). Il apparaît que la présentation de réponses d'élèves lors des entretiens peut agir comme révélateur des difficultés des enseignants. Au contraire lorsqu'il s'agit de contenus que les enseignants maîtrisent, cette présentation peut contribuer au développement de leurs connaissances professionnelles en leur donnant l'occasion d'identifier des erreurs d'élèves qu'ils n'avaient pas repérées auparavant.

Mots clés : *curriculum, connaissances professionnelles des enseignants, importance du contenu disciplinaire, évolution des systèmes chimiques, transformation chimique.*

Abstract

This article sets out a study of the impact of the implementation of a new chemistry curriculum in grade 12 on teachers' professional knowledge. In-service teachers' semi-structured interviews were made to determine their knowledge of the subject matter content (evolution of chemical systems), their knowledge of curriculum issues and their knowledge of the students' learning difficulties. The introduction of the evolution of chemical systems and that of the evolution criterion are perceived as an issue of this curriculum whereas two other themes of this programme, chemical changes and chemical reactions, and chemical equilibrium and models are not. The presentation of students' authentic responses may reveal some teachers' conceptual difficulties. On the contrary if they have the mastery of the subject matter, it helps them to develop their professional knowledge by giving them the opportunity to identify errors made by some students which they had not previously detected.

Keywords: *curriculum, teachers' professional knowledge, importance of the subject matter, evolution of chemical systems, chemical change.*

Resumen

Este artículo estudia el impacto de la puesta en práctica de un nuevo programa de Química en clase de 2° de Bachillerato opción científica (grado 12) sobre los conocimientos profesionales de docentes. Determinamos, con ayuda de entrevistas semi-directivas con docentes en ejercicio, su conocimiento del contenido de enseñanza (la evolución de los sistemas químicos) de lo que está en juego en el programa (traducción de las intenciones didácticas de los autores del programa) y de las dificultades de los alumnos. La introducción de la evolución de los sistemas químicos y la del criterio de evolución son percibidas efectivamente como lo que está en juego en este programa al contrario de otros dos temas (transformación y reacción químicas, equilibrio químico y modelos). La presentación de respuestas de alumnos en las entrevistas puede actuar como revelador de las dificultades de los docentes. Al contrario, cuando se trata de contenidos que los docentes dominan, esta presentación contribuye al desarrollo de sus conocimientos profesionales, dándoles la ocasión de identificar errores de alumnos que no habrían descubierto antes.

Palabras clave : *currículum – conocimientos profesionales de los docentes – importancia del contenido disciplinario – evolución de los sistemas químicos – transformación química.*

Zusammenfassung

Dieser Artikel beobachtet die Einführung eines neuen Lehrplans in Chemie in der 12 Klasse und seinen Einfluss über die beruflichen Kenntnisse der Lehrer. Gespräche mit amtierenden Lehrern wurden geführt, um folgende Punkte zu bestimmen : Kenntnisse über den zu unterrichtenden Stoff (die Entwicklung der chemischen Systeme), über die Schwerpunkte des Lehrplans (Umsetzung der didaktischen Absichten der Lehrplanverfasser), Schwierigkeiten der Schüler. Die Einführung der Entwicklung der chemischen Systeme und des Entwicklungskriterium werden tatsächlich als ein Schwerpunkt dieses Lehrplans empfunden, im Gegensatz zu den beiden anderen Themen (chemische Verwandlung und chemische Reaktion, chemisches Gleichgewicht und Modelle). Die Vorstellung von Schülerantworten bei den Gesprächen kann die Schwierigkeiten der Lehrer aufdecken. Im Gegenteil, wenn es sich um Lernstoffe handelt, die die Lehrer beherrschen, trägt diese Vorstellung zur Entwicklung ihrer beruflichen Kenntnisse bei, weil sie ihnen ermöglicht, Schülerschwierigkeit zu entdecken, die sie vorher nicht gesehen hatten.

Schlüsselwörter: *Lehrplan, berufliche Kenntnisse der Lehrer, Bedeutung des fachbezogenen Lerninhalts, Entwicklung der chemischen Systeme, chemische Verwandlung*

1 CONTEXTE

1.1 Introduction d'un nouveau programme

Dans le cadre de la rénovation des programmes de lycée d'enseignement général en France, amorcée en septembre 2000 en classe de seconde, poursuivie en 2001 en classe de première, un nouveau programme de chimie est entré en application en septembre 2002 en classe de terminale S. Ce programme traite de l'évolution des systèmes chimiques. Ce thème est abordé dès la classe de seconde : l'évolution d'un système y est décrite comme la succession des états par lesquels passe le système, chaque état étant caractérisé par les valeurs de différentes variables, notamment les quantités de matières des réactifs et des produits. Le programme de la classe de terminale S introduit une procédure systématique permettant de prévoir ou d'expliquer le sens d'évolution d'un système, en comparant le quotient de réaction du système à la constante d'équilibre. À cette approche thermodynamique vient s'ajouter une approche cinétique qui permet d'aborder le caractère dynamique des états d'équilibre chimique.

1.2 Intentions didactiques des auteurs du programme

Les auteurs du programme de chimie ont explicité leurs intentions ; il s'agit de proposer une nouvelle approche de l'évolution des systèmes chimiques (Davous *et al.*, 2003). L'introduction du quotient de réaction permet de proposer un critère d'évolution au « caractère très général » (Davous *et al.*, 2002). Les auteurs insistent également sur la différence à faire entre faits expérimentaux et modèles, préoccupation déjà exprimée par les auteurs du programme précédent (Goffard, 1994). Ils soulignent « l'importance accordée à la notion de modèle, en particulier par le double regard macroscopique microscopique » (Davous *et al.*, 2003) et font référence à des activités qui doivent développer ce double regard chez les élèves.

Caractériser la différence entre faits et modèles dans le cas des phénomènes chimiques se traduit dès la classe de seconde par l'introduction de deux notions distinctes : la transformation chimique du système qui est une description des faits et la réaction chimique (symbolisée par l'équation de réaction) qui l'interprète. Laugier & Dumon (2000) ont signalé la difficulté des élèves à comprendre la présence d'un réactif en excès dans le milieu réactionnel après transformation alors que l'écriture de l'équation de réaction (avec une flèche) évoque une disparition des réactifs. De même ils indiquent que les élèves comprennent difficilement qu'une même équation

de réaction puisse servir à représenter des situations expérimentales différentes (Laugier & Dumon, 2000). D'autres études ont montré que des élèves conçoivent les espèces situées de chaque côté de l'équation de réaction comme séparées physiquement les unes des autres (Gorodetsky & Gussarsky, 1986 ; Stavridou & Solomonidou, 2000 ; Chiu, Chou & Liu, 2002). Ces élèves font preuve d'une centration sur l'équation de réaction au détriment de la situation expérimentale, sur laquelle ils ont tendance à projeter la structure du modèle. Différencier clairement ce qui relève de la description de la situation et de son interprétation constitue une étape dans la compréhension des phénomènes chimiques que la distinction entre les notions de transformation chimique et de réaction chimique peut aider à franchir.

2 CADRE THÉORIQUE

Une étude (Kermen, 2007) a été conduite pour évaluer l'impact de la mise en place de ce nouveau programme en classe de terminale sur les connaissances et raisonnements des élèves d'une part, sur les connaissances professionnelles des enseignants d'autre part. Dans cet article nous nous intéressons à ce dernier aspect et mettons l'accent sur certaines composantes des savoirs professionnels que des enseignants ont développés par l'enseignement de ce programme. L'une des finalités de ce travail consiste à fournir des informations pertinentes pour des formations d'enseignants.

Les travaux sur la formation des enseignants de sciences sont nombreux ; nous faisons référence à ceux qui insistent sur les liens entre contenu enseigné et connaissances professionnelles des enseignants.

2.1 Perception d'intentions didactiques

Dans la mesure où nous étudions la mise en place d'un programme, nous recherchons si certaines intentions didactiques des auteurs de programme sont perçues par les enseignants. Hirn (1995) ou Couchouron *et al.* (1996) ont cherché par le biais d'entretiens semi-directifs à caractériser l'écart entre les intentions didactiques des auteurs de programme et ce que pensent ou font les enseignants. Hirn (1995) indique que ce type d'étude permet aussi d'obtenir des informations sur les conceptions des enseignants. Couchouron *et al.* (1996) ont constaté que les habitudes professionnelles limitent la perception des nouveautés. Plus récemment dans le cadre d'un projet de recherche européen STTIS, Viennot *et al.* (2005) suggèrent de fournir une aide aux enseignants afin de

mieux percevoir les intentions didactiques. Cette aide consiste à expliciter les objectifs, les points de vue sur l'apprentissage, les idées communes des élèves. L'analyse de documents (productions d'élèves, propositions d'autres enseignants) doit permettre la prise de conscience de leurs propres conceptions et de celles des élèves, et d'attirer leur attention sur des détails considérés comme critiques pour la réussite de la démarche (Viennot *et al.*, 2005).

2.2 Pedagogical content knowledge

Selon un autre courant de recherche, « savoir comment enseigner un sujet donné » relève de la possession de PCK, *Pedagogical content knowledge* (Shulman, 1986), ou connaissance pédagogique du contenu (De Jong, 1998). Shulman (1987) a cherché à caractériser les divers domaines de connaissances nécessaires aux enseignants afin d'exercer leur activité professionnelle. Il considère que l'étude des interactions entre le contenu disciplinaire et la pédagogie constituait le paradigme manquant des recherches sur l'enseignement (Shulman, 1999). Depuis cette notion a fait l'objet de nombreuses recherches comme l'indiquent Baxter et Lederman (1999). Certains auteurs (Van Driel *et al.*, 1998 ; De Jong, 2003) soulignent les modifications apportées par les uns et les autres à la définition originelle. Ils s'accordent pour convenir que la connaissance pédagogique du contenu (PCK) résulte de la transformation d'au moins deux domaines de connaissances, les connaissances pédagogiques générales et les connaissances disciplinaires (Gess-Newsome, 1999) et constitue un domaine distinct, nouveau (Magnusson *et al.*, 1999). Elle est élaborée notamment à partir de connaissances sur les programmes, sur les difficultés d'apprentissage et les conceptions des élèves à propos d'un sujet précis, sur les stratégies d'enseignement des sciences (Magnusson *et al.*, 1999). Son développement s'effectue par un processus intégré enraciné dans la pratique (Van Driel *et al.*, 1998 ; De Jong, 2003), ce qui explique que les enseignants débutants ou traitant d'un sujet donné pour la première fois en soient dépourvus. Pour améliorer la connaissance pédagogique du contenu (PCK) d'enseignants, ces auteurs proposent de s'appuyer sur des analyses critiques d'ouvrages scolaires, d'étudier des réponses d'élèves sur le sujet étudié (Van Driel *et al.*, 1998), de discuter de propositions d'autres enseignants concernant l'enseignement de ce sujet (De Jong, 1998).

Dans cette étude, nous cherchons à caractériser la maîtrise du contenu « évolution des systèmes chimiques » par les enseignants, leur perception des enjeux du programme et leur connaissance des difficultés des élèves, que nous considérons comme des éléments du savoir professionnel à propos de ce programme.

3 ANALYSE DU PROGRAMME DE TERMINALE

Avant d'évaluer l'impact des nouveautés du programme sur les connaissances des enseignants, nous présentons une analyse du programme afin notamment de préciser le contenu en question et les enjeux.

Le programme est analysé selon deux dimensions, une dimension épistémologique qui concerne les modèles et leurs liens avec le registre empirique et une dimension didactique qui porte sur la traduction des intentions didactiques des auteurs en termes de contenus et de compétences exigibles au baccalauréat. Notons en effet que la note de service qui réglemente le baccalauréat (examen national à sujet unique pour tous les élèves de terminale) stipule que seules seront évaluées les compétences exigibles (MEN, 2002a), ce qui constitue une contrainte institutionnelle forte.

3.1 Analyse épistémologique du programme

Il est possible de considérer trois registres étroitement liés (Walliser, 1977 ; Tiberghien *et al.*, 1995), le registre théorique, le registre des modèles et le registre empirique, le modèle agissant comme un médiateur entre la théorie et la situation expérimentale. L'évolution des systèmes chimiques est abordée sous deux aspects, cinétique et thermodynamique, auxquels correspondent des champs théoriques différents et des modèles différents. Les situations expérimentales sont communes aux deux approches, ce qui devrait favoriser la distanciation entre les deux registres (Larcher, 1994).

Le registre empirique

Nous considérons que le registre empirique peut être divisé en deux niveaux.

Au premier niveau, il est question d'événements : un barreau gris est placé dans un liquide bleu, au bout d'un certain temps on observe que ce barreau est recouvert d'un dépôt solide rougeâtre et que le liquide a changé de couleur pour devenir quasiment incolore. Cette description des évènements fait appel aux notions de liquide, solide, couleur, qui ne sont pas spécifiques à la chimie.

Au second niveau, on parle d'espèces chimiques (ou substances chimiques) : un barreau de zinc est introduit dans une solution de sulfate de cuivre ; il se forme du cuivre et des ions cuivre disparaissent. Des expériences complémentaires permettent d'affirmer la présence d'une

nouvelle espèce chimique, l'ion zinc. On peut faire un bilan qualitatif des espèces présentes initialement et de celles présentes après le changement observé. Certaines substances telles que l'eau, les ions sulfate, n'ont pas changé, elles n'ont pas participé à l'évolution du système. On décrit alors l'état initial du système en précisant le nom des espèces chimiques présentes, leur formule chimique, leur état physique, leur quantité de matière. On fait de même pour l'état final. Le passage d'un état du système à un autre est appelé transformation du système ; ici il s'agit d'une transformation chimique car on constate la modification de la nature des substances chimiques constituant le système ou de leurs quantités de matière. Ce second niveau du registre empirique constitue une deuxième étape dans la représentation du monde. Reprenant le point de vue développé par Martinand (2002), nous considérons ce second niveau de représentation comme empirique dans la mesure où il s'appuie sur des « savoirs disponibles [...] qui sont l'aboutissement de processus antérieurs » de conceptualisation ou d'abstraction « inconsciemment projetés sur la réalité sans plus de questionnement sur leur origine et leur validité » (Martinand, 2002) ; nous considérons en effet que les utilisateurs n'ont plus conscience qu'il s'agit d'une construction intellectuelle de sorte qu'ils l'utilisent comme si c'était la réalité.

Le registre des modèles

Dans le programme, l'évolution des systèmes chimiques est abordée de deux points de vue : l'un, thermodynamique, s'attache à la détermination du sens d'évolution ; l'autre, cinétique, s'intéresse à la vitesse à laquelle le système évolue. La confrontation du savoir scientifique de référence au contenu du programme nous conduit à considérer trois modèles : un modèle thermodynamique, un modèle cinétique macroscopique et un modèle cinétique microscopique.

Le modèle thermodynamique, issu de la thermodynamique des processus irréversibles, et plus précisément du second principe, comporte principalement deux éléments, un couple de réactions inverses l'une de l'autre symbolisé par l'équation chimique d'une part, le critère d'évolution consistant à comparer le quotient de réaction du système dans l'état considéré à la constante d'équilibre d'autre part.

Le modèle cinétique macroscopique, qui provient de la théorie cinétique chimique, s'appuie sur l'équation chimique qui représente la réaction directe et la réaction inverse, et les vitesses de ces deux réactions.

Le modèle cinétique microscopique, qui emprunte à la théorie des collisions l'idée de chocs efficaces et à la théorie du complexe activé son champ d'application (les solutions et les gaz), représente le système

chimique comme un ensemble de particules en mouvement incessant qui, à l'occasion de chocs particuliers dits chocs efficaces, changent de nature (des liaisons sont rompues, d'autres se forment, des électrons sont transférés).

Le couple de réactions inverses symbolisé par l'équation chimique

L'interprétation de la transformation chimique d'un système s'effectue à l'aide d'une équation chimique ou équation de réaction telle que $\alpha A_{(aq)} + \beta B_{(s)} = \gamma C_{(aq)} + \delta D_{(sq)}$ symbolisant un couple de réactions chimiques inverses. Le couple de réactions chimiques inverses symbolisé par l'équation de réaction apparaît comme un modèle permettant d'interpréter de manière unificatrice (Méheut & Chomat, 1990) toutes les transformations chimiques mettant en jeu A, B, C et D, quelles que soient les quantités en présence et quel que soit le sens d'évolution. Connaître le couple de réactions inverses permet aussi de dire qu'il ne se passera rien si initialement seuls sont présents A et C par exemple. Cependant elle ne suffit pas pour prévoir ou justifier un sens d'évolution lorsque toutes les espèces chimiques sont initialement présentes, elle ne représente qu'un élément d'un modèle permettant d'interpréter et de prévoir l'évolution d'un système chimique.

Le modèle thermodynamique

Le modèle thermodynamique comporte deux éléments principaux : un couple de réactions symbolisé par une équation chimique et le critère d'évolution. Mettre en œuvre le critère d'évolution consiste à comparer la valeur du quotient de réaction du système dans un état donné, à la valeur de la constante d'équilibre. Pour l'équation de réaction donnée ci-dessus, le quotient de réaction s'écrit :

$$Qr = \frac{[D]^{\delta}\ [C]^{\gamma}}{[A]^{\alpha}}$$

La quantité de B n'intervient pas dans cette expression[1] puisque l'activité d'un solide pur est prise égale à 1, qu'il soit présent ou non.

Si le quotient de réaction initial est différent de la constante d'équilibre, le système peut évoluer (dans le sens direct si le quotient de

---

(1) Plus généralement $Qr = \frac{a_c^{\gamma}\ a_D^{\delta}}{a_A^{\alpha}\ a_B^{\beta}}$, en terminale l'activité d'un soluté est prise égale au rapport de sa concentration et de la concentration de référence égale à 1 mol/L, celle d'un solvant est prise égale à 1, ce qui correspond à l'approximation des solutions diluées.

réaction est inférieur à la constante d'équilibre, dans le sens inverse dans le cas contraire). Si le quotient de réaction est égal à la constante d'équilibre, le système n'évolue pas, il est en état d'équilibre chimique. Appliquer le critère peut être vu comme une succession d'étapes. Connaissant la composition du système, on consulte l'équation de réaction pour voir si les espèces en présence peuvent réagir. On exprime le quotient de réaction, qui est étroitement dépendant de l'écriture de l'équation chimique. On calcule la valeur du quotient de réaction dans l'état considéré. On compare cette valeur à la constante d'équilibre et on explique ou on prévoit le sens d'évolution du système ou son absence d'évolution. Cependant, cette procédure connaît des limites d'application. Par exemple, prenons le cas d'un système pour lequel dans l'état initial l'espèce solide B est absente alors que les autres espèces, des solutés, sont présentes. La valeur initiale du quotient de réaction est calculée, si elle est inférieure à la constante d'équilibre, le critère d'évolution prévoit une évolution dans le sens direct qui s'avère impossible à réaliser puisqu'il n'y a pas d'espèce B pour réagir avec A. Un autre cas limite survient lorsque le solide B est effectivement présent initialement, mais en quantité insuffisante pour que le quotient de réaction puisse devenir égal à la constante d'équilibre.

Le modèle cinétique macroscopique

Dans l'approche cinétique macroscopique, on s'intéresse à la vitesse de la réaction directe et à la vitesse de la réaction inverse[2]. La transformation chimique est représentée par les deux réactions inverses et l'évolution de la concentration d'une espèce au cours du temps est le résultat global de ces deux processus. À un instant quelconque on n'accède expérimentalement qu'à la vitesse globale de réaction[3] qui est la différence entre les deux vitesses précédemment évoquées. Sachant que l'évolution a lieu dans le sens direct ou dans le sens inverse, on peut en déduire que la vitesse de la réaction directe est supérieure ou inférieure à la vitesse de la réaction inverse.

Ce modèle n'a aucun caractère prédictif si l'on ne connaît pas les lois de vitesse des deux réactions inverses, puisqu'on ne dispose pas de théorie générale sur les vitesses de réaction (Vidal & Lemarchand, 1988, p. 14).

(2) On peut déterminer ces vitesses expérimentalement si l'évolution n'est représentée que par une réaction chimique, donc si chacun des processus inverses a lieu en l'absence de l'autre. Cela peut se concevoir à l'instant initial, lorsqu'on considère un système ne comportant que les espèces situées à gauche du signe « = » ou que les espèces situées à droite.

(3) Sous réserve que la transformation soit correctement représentée par un seul couple de réactions inverses, ce qui est toujours le cas en classe de terminale avec les exemples proposés dans le document d'accompagnement du programme notamment.

Ce modèle n'a qu'un caractère explicatif. Lorsque le sens d'évolution est déterminé à l'aide du modèle thermodynamique, il est possible de dire laquelle des deux vitesses est supérieure à l'autre. Lorsque le système est parvenu à l'état d'équilibre chimique, ce modèle permet d'expliquer pourquoi la composition du système ne change pas alors que toutes les espèces susceptibles de réagir sont encore présentes : les deux processus antagonistes ont lieu simultanément à vitesses égales donc leurs effets se neutralisent.

Le modèle cinétique microscopique

Dans un modèle cinétique microscopique, un système chimique est considéré comme un ensemble constitué d'un nombre considérable (de l'ordre du nombre d'Avogadro) d'entités chimiques (atomes, ions ou molécules) de différentes natures, qui se heurtent sans cesse. Les collisions efficaces conduisent à la formation de nouvelles entités résultant d'une recombinaison des entités primitives ou d'une redistribution des électrons.

Dans le cas de réactions non élémentaires, pour une équation du type $\alpha A + \beta B = \gamma C + \delta D$ il n'est pas toujours possible de déterminer quels sont les chocs efficaces, par exemple s'ils mettent en jeu une entité A et une entité B ou plusieurs, si un tel choc conduit directement à C et D ou à des intermédiaires. On peut simplement dire qu'au cours de chocs efficaces des entités changent de nature, et que, tant que le système évolue, les chocs efficaces conduisent globalement à la formation de C et D (si l'évolution a lieu dans le sens direct). Lorsque le système est en état d'équilibre chimique, des chocs continuent à avoir lieu et les fréquences des chocs efficaces de toute nature sont telles que la population de chaque espèce chimique est constante.

Ce modèle permet donc d'expliquer, de manière essentiellement qualitative, le sens d'évolution ou l'état d'équilibre d'un système ; il ne permet pas de prévoir le sens d'évolution du système.

3.2 Analyse didactique du programme

Par l'examen des différentes rubriques du programme (contenus, commentaires, compétences exigibles au baccalauréat), nous étudions comment les intentions didactiques des auteurs du programme se traduisent dans le libellé du programme lui-même. La lecture du programme et notre analyse du savoir de référence nous ont conduits à nous intéresser à trois thèmes principaux : les transformations non totales, le critère d'évolution spontanée, l'état d'équilibre chimique. Notons que ces thèmes présentent

des recoupements. Ils constituent des nouveautés pour les élèves par rapport aux contenus enseignés dans les classes antérieures.

Les transformations non totales

Les transformations non totales sont caractérisées par un avancement final inférieur à l'avancement maximal ; cette connaissance fait l'objet d'une compétence exigible. L'étude de ces transformations est l'occasion d'introduire le concept de réaction inverse qui intervient également dans l'interprétation cinétique de l'état d'équilibre. Le modèle utilisé depuis la classe de seconde qui n'impliquait qu'une réaction chimique dans le sens de la transformation doit donc être modifié. Pour mieux apprécier la nature de ces changements, il convient de rappeler ce que les auteurs du programme ont écrit à ce propos.

Rappels du programme de seconde

En classe de seconde, la distinction entre transformation et réaction chimiques fait l'objet de recommandations précises. Dans les objectifs généraux du programme (MEN, 1999, p. 8), on peut lire « 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 ». L'introduction de la troisième partie du programme « les transformations de la matière » reprend ces préoccupations : « L'enseignant fait bien la distinction entre la transformation subie par le système et la réaction chimique qui modélise cette transformation » (MEN, 1999, p. 15). Il est également indiqué que les modèles ont des limites et qu'à ce titre la réaction chimique est un modèle macroscopique qui ne dit rien des processus microscopiques, dont rend compte le mécanisme réactionnel (autre modèle), dont l'étude n'est pas abordée en seconde, ni en terminale d'ailleurs.

Modification du modèle

En terminale, l'introduction de la notion de réaction inverse, nécessaire pour rendre compte des transformations non totales, constitue une modification majeure du modèle enseigné en classe de seconde. Elle

ne fait cependant pas l'objet de recommandation explicite. Il n'est pas dit que la réaction inverse est une nouvelle notion dont l'introduction vient modifier le modèle proposé dans les classes antérieures. Il n'est pas fait appel aux termes de modèle ou de modélisation[4] pour représenter les transformations chimiques non totales. Associer deux réactions inverses simultanées à une transformation non totale devrait accentuer la différence de nature des deux concepts et accroître la nécessité de les distinguer. L'absence de recommandation ayant trait au statut de modèle du couple de réactions inverses tranche avec ce qu'on peut lire dans le programme de la classe de seconde.

À propos de réaction inverse

Les termes utilisés dans le programme à propos du concept de réaction inverse sont variables. Les commentaires de la partie A[5] mentionnent la réaction directe et la réaction inverse, puis, dans la partie B, il n'est plus question de deux réactions mais d'une seule réaction ayant lieu dans les deux sens. Et dans le cas de l'estérification-hydrolyse où les deux réactions inverses l'une de l'autre portent chacune un nom consacré par l'usage (partie D), on observe un retour à la mention de deux réactions en sens inverses.

Ces deux formulations, « réaction directe et réaction inverse », et « réaction ayant lieu dans les deux sens », ne sont pas équivalentes. Il semble difficile de concevoir qu'un même processus « la réaction » puisse s'effectuer simultanément dans un sens et dans l'autre. Envisager deux processus distincts, deux réactions différentes, permet d'éviter cette difficulté (Pedrosa & Dias, 2000).

L'état d'équilibre chimique d'un système

L'analyse épistémologique du programme a montré que l'état d'équilibre d'un système est envisagé d'un triple point de vue, thermodynamique, cinétique macroscopique et cinétique microscopique, à chacun de ces points de vue correspondant un modèle différent.

L'absence d'évolution des quantités de matière dans l'état d'équilibre, tout comme l'égalité du quotient de réaction et de la constante

(4) Les termes de modèle et modélisation ne sont utilisés qu'à deux reprises dans tout le programme de chimie de terminale (activités, contenus, compétences et commentaires compris) : l'un pour désigner le « modèle microscopique » permettant d'interpréter le rôle de la température et des concentrations à propos de la rapidité d'une transformation (MEN, 2001, p.96), l'autre pour parler de « la modélisation d'un état d'équilibre dynamique à l'échelle microscopique » (MEN, 2001, p.98).

(5) le programme est divisé en quatre parties A, B, C et D.

d'équilibre, font l'objet de compétences exigibles au baccalauréat, ainsi que « savoir que cet état d'équilibre est dynamique » (MEN, 2001, p. 98). Cependant, une lecture attentive du programme montre qu'il n'est question de vitesse (à propos de l'état d'équilibre chimique) que dans l'introduction générale du programme (MEN, 2001, p. 76) et non dans son libellé. L'interprétation de l'état d'équilibre à l'échelle microscopique figure dans la rubrique « contenus », sans faire l'objet d'une compétence exigible. L'interprétation à l'échelle macroscopique en termes de vitesses des réactions inverses n'apparaît dans aucune rubrique. Que peut alors signifier cette compétence « Savoir qu'un état d'équilibre est dynamique » ?

Le critère d'évolution

Le préambule du paragraphe du programme qui introduit le critère d'évolution spontanée commence par « Tout système chimique évolue spontanément vers un état d'équilibre » (MEN, 2001, p. 99). Il est suivi d'un commentaire qui développe les divers cas résultant de la comparaison du quotient de réaction à la constante d'équilibre. Les contenus font l'objet de compétences exigibles claires et précises. L'exemple des systèmes hétérogènes pour lesquels on peut rencontrer des situations où le système ne peut parvenir à l'équilibre faute de solide en quantité suffisante, n'est pas signalé.

Le programme indique qu'on ne peut parler du sens d'une transformation (ou sens d'évolution d'un système) qu'en précisant le système étudié et sa composition dans l'état considéré. On note là une différence par rapport à ce qui était fait antérieurement. En effet, dans les commentaires du programme 1995, la seule donnée de la constante d'équilibre était considérée comme suffisante pour prévoir l'évolution d'un système : « On précisera le sens d'une réaction acido-basique par la comparaison de deux couples HA_1 / A_1^- et HA_2 / A_2^- et en déterminant la constante K_R de la réaction (R) associée :

$$HA_1 + A_2^- \rightleftharpoons A_1^- + HA_2 \text{ , } K_r = \frac{K_{a1}}{K_{a2}}$$ » (MEN, 1995)

alors que dans ceux de 2002 on peut lire au tout début des commentaires consacrés au critère d'évolution « la constante d'équilibre K ne permet pas de prévoir le sens d'évolution du système » (MEN, 2001, p. 100).

3.3 Apports du document d'accompagnement

Les auteurs ont conçu un document d'accompagnement pour proposer une « mise en œuvre pratique du programme, qui en explicite à la fois l'esprit général et en précise certaines intentions particulières » (MEN,

2002b, p. 5). Cependant ils soulignent que « la seule référence officielle est constituée par le programme » (MEN, 2002b, p. 5). Il nous a semblé que la consultation de ce document pourrait nous aider à éclairer certaines imprécisions, bien que seul le programme puisse être considéré comme ayant un caractère réglementaire.

L'examen des activités et compléments proposés dans le document d'accompagnement montre qu'il est fait mention de deux réactions inverses l'une de l'autre, et non plus de « la réaction dans les deux sens ». Les activités font allusion à une modification du modèle utilisé jusque là pour représenter les transformations chimiques. L'état d'équilibre chimique est interprété d'un point de vue cinétique de deux manières : par l'égalité des vitesses des réactions inverses d'une part, à l'aide d'un modèle microscopique d'autre part. Deux limites d'application du critère d'évolution sont évoquées (sans être exprimées en ces termes), une évolution imperceptible correspondant à un avancement quasi nul et un état d'équilibre non atteignable.

Le document d'accompagnement apporte donc des réponses aux questions soulevées par l'analyse du programme. Cependant il subsiste une certaine indétermination quant au rôle des modèles. Il n'est pas explicitement signalé que des modèles différents permettent d'interpréter l'état d'équilibre chimique, ni souligné quand l'occasion se présente qu'un modèle connaît des limites d'application. Au travers du document d'accompagnement, l'utilisation des modèles apparaît bien comme un enjeu du programme, ce que le libellé du programme ne laissait guère apparaître, contrairement à celui de la classe de seconde.

4 PROBLÉMATIQUE

Cette étude concerne certaines composantes du savoir professionnel élaboré par les enseignants à propos de ce programme, à savoir leur connaissance du contenu disciplinaire, leur perception des enjeux du programme et des difficultés des élèves.

La comparaison des contenus de ce programme à ceux enseignés dans les classes antérieures nous a conduits à nous intéresser à trois thèmes qui constituent des nouveautés pour les élèves : les transformations non totales, le critère d'évolution spontanée, l'état d'équilibre chimique. La prise en compte des intentions didactiques exprimées par les auteurs du programme et l'analyse épistémologique du contenu nous ont permis de préciser ces thèmes et de les considérer comme des enjeux du programme. Dans les paragraphes suivants, nous désignons ces trois thèmes ou enjeux par les appellations suivantes : « transformation et réaction » pour

le premier, « évolution et critère » pour le second, « équilibre et modèles » pour le troisième.

Explicitons ces différents thèmes et précisons en quoi ils constituent des enjeux.

4.1 Thème « transformation et réaction »

L'introduction des transformations non totales est l'occasion de revenir sur le concept de réaction chimique enseigné en classe de seconde puisqu'on doit considérer deux réactions inverses pour expliquer que, selon la composition initiale d'un système, l'évolution peut avoir lieu dans le sens direct ou dans le sens inverse, et que dans l'état final il peut rester des espèces qui ont réagi. Lors de l'interprétation de l'état final comme état d'équilibre chimique, la distinction entre les concepts de transformation chimique et de réaction chimique prend un nouveau relief. La composition du système étant constante au cours du temps, il n'y a pas de transformation. Imaginer deux réactions inverses l'une de l'autre ayant lieu simultanément à la même vitesse permet de comprendre pourquoi il n'y a plus d'évolution alors que toutes les espèces susceptibles d'interagir sont encore présentes.

Notons que la distinction entre transformation et réaction avait fait l'objet de recommandations particulières dans le libellé du programme de la classe de seconde, alors que la modification qui est apportée au modèle en classe de terminale n'est pas soulignée dans le libellé du programme.

4.2 Thème « évolution et critère »

L'état d'un système au cours de son évolution est caractérisé par une nouvelle grandeur, le quotient de réaction. L'état d'équilibre chimique est présenté comme le terme de l'évolution du système, alors qu'il comporte encore des espèces susceptibles de réagir. La prévision ou l'explication du sens d'évolution d'un système s'effectue à l'aide du critère d'évolution, qui consiste à comparer la valeur du quotient de réaction dans l'état initial à la constante d'équilibre. Il s'agit là de nouveautés importantes par rapport au programme précédent dans lequel l'évolution d'un système n'était pas un des thèmes principaux. L'état initial du système n'était pas pris en compte et deux procédures différentes étaient utilisées selon le type de transformations : il fallait raisonner sur la valeur de la constante d'équilibre dans le cas de transformations acido-basiques et par comparaison des potentiels standard en oxydoréduction.

Notons que l'utilisation du critère fait l'objet de compétences exigibles des élèves, claires et précises ; par contre les cas limites ne sont pas évoqués.

4.3 Thème « équilibre et modèles »

L'analyse du programme a montré que l'état d'équilibre d'un système est envisagé d'un triple point de vue, thermodynamique, cinétique macroscopique et cinétique microscopique, à chacun de ces points de vue étant associé un modèle différent. Dans l'état d'équilibre, le quotient de réaction est égal à la constante d'équilibre. Interpréter l'absence d'évolution (malgré la présence de toutes les espèces susceptibles d'interagir) par l'égalité de la vitesse de la réaction directe et de celle de la réaction inverse constitue une explication cinétique macroscopique. Si l'on situe l'explication à l'échelle microscopique il faut alors considérer que les chocs efficaces entre particules sont en nombres tels que la population moyenne de chaque type de particule ne varie pas au cours du temps.

Parmi ces trois façons différentes d'interpréter cet état du système, seule la première fait l'objet d'une compétence exigible des élèves au baccalauréat.

4.4 Questions de recherche

Notre étude vise à explorer les connaissances qu'ont les enseignants du contenu disciplinaire, des enjeux du programme et des difficultés des élèves, types de connaissance qui interviennent dans l'élaboration des savoirs professionnels des enseignants, particulièrement de leur connaissance pédagogique du contenu (PCK).

Une première question se pose : les enseignants considèrent-ils ces trois thèmes comme des enjeux du programme ?

Cette question se décline de la façon suivante selon chaque thème ou enjeu.

La transformation d'un système chimique est distincte des réactions chimiques qui permettent de la modéliser. Cette distinction est-elle effectuée par les enseignants lorsqu'il est question de l'évolution du système ou de son arrêt ? Les enseignants utilisent-ils indifféremment les termes transformation et réaction ?

Au critère d'évolution est associée l'idée que la plupart des systèmes évoluent vers un état d'équilibre. Les enseignants sont-ils conscients de ce

changement de point de vue par rapport à l'ancien programme ? Qu'est-ce que l'utilisation du critère d'évolution apporte par rapport à la démarche préconisée dans l'ancien programme ? Connaissent-ils les limites de l'utilisation du critère ?

L'interprétation de l'état d'équilibre chimique est l'occasion d'utiliser les trois modèles signalés ci-dessus. Les enseignants privilégient-ils un modèle, un type d'explication ?

La seconde question concerne les difficultés des élèves. Quelles difficultés des élèves les enseignants ont-ils détectées à travers leur pratique ? Quelles erreurs repèrent-ils à l'examen de réponses d'élèves ?

Comme différents chercheurs l'ont fait pour évaluer l'impact d'intentions didactiques (Viennot *et al.*, 2005), ou favoriser le développement de connaissances professionnelles locales (Morge, 2003), de connaissances pédagogiques du contenu (Van Driel *et al.*, 1998), nous avons choisi de placer les enseignants en situation de commenter des productions d'élèves.

Une troisième question se pose alors. Quel impact peut avoir la présentation de réponses d'élèves sur des enseignants ? Permet-elle d'estimer leur maîtrise du contenu disciplinaire ?

5 MÉTHODOLOGIE

Des entretiens semi-directifs ou focalisés (Bardin, 1993) ont été menés auprès de 15 professeurs de sciences physiques enseignant dans différents lycées de plusieurs académies. Ces enseignants (six femmes et neuf hommes) étaient titulaires depuis 5 années au moins. Dix d'entre eux avaient enseigné l'ancien programme de terminale S. Tous étaient volontaires ; ils n'ont eu connaissance avant l'entretien que du thème général, à savoir une discussion à propos du programme de chimie de terminale S.

5.1 Présentation du guide d'entretien

Le protocole d'entretien est constitué de deux parties (voir annexe 1).

La première comporte des questions ouvertes relatives aux difficultés d'apprentissage des élèves et aux enjeux du programme, puis focalisées sur les différents enjeux : les élèves ont-ils des difficultés à comprendre la différence entre transformation et réaction chimiques, à expliquer pourquoi une transformation chimique s'arrête, à écrire le quotient de réaction ?

Dans une deuxième partie, six réponses d'élèves (voir annexe 2) sont présentées aux enseignants. Chacune des ces réponses comporte au moins une erreur révélatrice d'une difficulté d'apprentissage.

La première réponse (R1) comporte une erreur dans l'expression du quotient de réaction. La deuxième (R2) propose une évolution malgré l'absence d'une espèce nécessaire, la situation étudiée constituant un cas limite d'application du critère d'évolution. Les quatre réponses suivantes expliquent l'arrêt de l'évolution d'un système après une transformation non totale. À propos de trois de ces réponses (R3, R4, R5), on demande aux enseignants ce qu'ils attendent comme explication ; on cherche à déterminer s'ils perçoivent l'intérêt d'utiliser un modèle cinétique pour interpréter un état d'équilibre chimique. La référence erronée au niveau microscopique faite par l'élève dans la dernière réponse (R6) doit permettre de savoir si le modèle cinétique microscopique est pris en compte par l'enseignant et comment il le conçoit.

Cette deuxième partie nous permet donc d'étudier de façon indirecte la connaissance des contenus disciplinaires qu'ont les enseignants.

5.2 Analyse des entretiens

Les entretiens ont été transcrits dans leur intégralité. Ils constituent un corpus dont le découpage en unités de signification (phrases ou extraits de phrases) est fondé sur le sens des propos recueillis et non sur leur forme (Bardin, 1993). Ces unités de signification ont été classées en catégories thématiques dépendant des questions de recherche auxquelles nous souhaitions répondre. Nous précisons maintenant la façon dont nous avons procédé pour déterminer si les enjeux du programme sont ressentis comme tels par les enseignants et quelle connaissance des difficultés et erreurs des élèves ils montrent.

Analyse des propos des enseignants concernant les enjeux du programme

Nous avons mis en œuvre une double approche, telle que décrite par exemple par Strauss et Corbin (1990). Il s'agit de catégoriser les propos des enseignants en référence aux questions que nos analyses préalables nous ont permis de dégager. Une telle approche comporte un caractère inductif, en ce sens que les catégories ne sont pas définies de manière rigide préalablement à l'analyse, mais certaines sont précisées progressivement dans des allers-retours entre données et catégories *a priori* issues des analyses préalables. Nos analyses préalables concernent le programme d'une part et les difficultés des élèves d'autre part. Nous avons précisé

les enjeux du programme (cf. § 4), l'enjeu « évolution et critère » apparaît clairement affirmé alors que les deux autres « transformation et réaction » et « équilibre et modèles » le sont moins. Nous avons ainsi pu mettre en évidence des points qui peuvent poser problème : la représentation d'une transformation chimique par deux réactions inverses, des cas limites d'utilisation du critère d'évolution, différentes interprétations de l'état d'équilibre ne faisant pas toutes l'objet de compétences exigibles des élèves.

Nous avons donc analysé les propos des enseignants en référence aux résultats de cette analyse afin de dégager des catégories.

Concernant le premier enjeu « transformation et réaction », nous avons considéré que les propos des enseignants pouvaient être classés dans huit catégories de réponses (détail des catégories dans le tableau 1). Ces propos ont été recherchés dans les réponses aux questions ayant un rapport avec la notion de transformation chimique et également dans les commentaires des réponses d'élèves. Les trois premières catégories sont directement issues de notre analyse du programme, la quatrième catégorie de notre analyse des difficultés d'élèves, tandis que les catégories suivantes ont émergé des données.

code	Catégories de réponses
Tr1	L'introduction des transformations non totales permet de « réactiver » la distinction entre transformation et réaction
Tr2	Deux réactions inverses pour expliquer l'évolution du système
Tr3	Deux réactions inverses pour expliquer l'arrêt d'une transformation non totale
Tr4	Les élèves ne comprennent pas bien la différence entre transformation et réaction
Tr5	L'enseignant ne comprend pas bien la différence entre transformation et réaction
Tr6	L'enseignant confond parfois transformation et réaction dans son discours
Tr7	La confusion entre transformation et réaction ne gêne pas la compréhension des élèves
Tr8	Cas où la confusion transformation réaction est gênante

Tableau 1 • **catégorisation des propos des enseignants sur le thème transformation et réaction**

Pour la catégorie Tr4 la plupart des enseignants ont développé leur réponse en expliquant pourquoi selon eux les élèves ne comprennent pas bien la différence entre les deux concepts, nous avons alors effectué une répartition de ces explications, selon que les enseignants disent ne pas mettre l'accent sur la distinction ou le mettre sur le concept de réaction.

De la même façon nous avons classé les propos des enseignants concernant le thème « évolution et critère » en huit catégories (tableau 2). Les quatre premières catégories proviennent de notre analyse du

programme, les quatre dernières sont liées aux raisonnements repérés parmi les élèves.

Concernant les catégories Cr3 et Cr4, nous avons également recherché si les enseignants complétaient leur réponse, en caractérisant l'apport du critère d'évolution pour l'une, en fournissant un cas limite d'utilisation du critère ou en identifiant un tel cas devant la réponse d'élève R2 pour l'autre.

code	Catégories de réponses
Cr1	mention de l'évolution des systèmes chimiques de façon générale
Cr2	l'état d'équilibre chimique vu comme terme de l'évolution du système.
Cr3	évolution du système évoquée avec le critère d'évolution
Cr4	cas limites d'utilisation du critère d'évolution pas mentionnés
Cr5	utilisation du critère pour prévoir l'évolution quand toutes les espèces sont présentes initialement
Cr6	utilisation du critère d'évolution pour prévoir lorsque seuls les réactifs sont présents
Cr7	utilisation du critère d'évolution pour prévoir lorsqu'une seule espèce est manquante
Cr8	utilisation du critère pour justifier une absence d'évolution

Tableau 2 • **propos tenus par les enseignants sur le thème évolution et critère**

De la même façon nous avons classé les propos des enseignants concernant le thème « équilibre et modèle » en sept catégories (tableau 3).

code	catégories de réponses
Eq1	état d'équilibre et quotient de réaction
Eq2	état d'équilibre et réactions inverses
Eq3	état d'équilibre et chocs efficaces
Eq4	la réaction chimique ou la vitesse de réaction considérée comme un concept microscopique
Eq5	la vitesse de réaction est une grandeur macroscopique
Eq6	les chocs efficaces correspondent au plan microscopique
Eq7	l'explication de l'état d'équilibre au plan microscopique n'est pas enseignée

Tableau 3 • **propos tenus par les enseignants sur le thème équilibre et modèles**

Les trois premières catégories concernent l'utilisation de l'un ou l'autre des trois modèles et proviennent de notre analyse du programme. Les catégories suivantes sont en liaison directe avec la structure du protocole d'entretien (cf. § 5.1) issue de nos analyses des difficultés des élèves. La présentation de la réponse R6 avait pour but de focaliser les entretiens sur l'interprétation microscopique de l'état d'équilibre chimique. La catégorie Eq4 correspond au point de vue erroné exprimé par l'élève

dans cette réponse et permet de déterminer si les enseignants partagent ce point de vue. Les catégories suivantes ont émergé de l'examen des données et correspondent aux points principaux de la discussion qui suit la présentation de la réponse R6.

Analyse des propos des enseignants concernant les difficultés des élèves

À partir de l'analyse du programme et de réponses d'élèves à différentes questions (Kermen, 2007), nous avons établi une liste des difficultés d'apprentissage rencontrées par les élèves et des erreurs qu'ils sont susceptibles de commettre. Des erreurs détectées, ou de l'absence de réponse, on infère la présence d'une difficulté ; à une même difficulté peuvent correspondre plusieurs erreurs.

Dans un premier temps nous avons relevé dans les transcriptions d'entretiens quelles difficultés ou erreurs les enseignants citent.

Dans un deuxième temps nous avons noté quelles erreurs les enseignants identifient dans les réponses d'élèves. Nous cherchons à voir s'il y a correspondance entre les contenus disciplinaires signalés par les enseignants comme pouvant poser problème aux élèves, et ceux pour lesquels ils identifient une erreur dans les réponses qui leur sont soumises.

6 RÉSULTATS ET DISCUSSION

6.1 Point de vue des enseignants sur les enjeux du programme

La distinction entre transformation et réaction est-elle perçue comme un enjeu ?

Aucun des enseignants interrogés n'exprime l'idée que l'introduction des transformations non totales en terminale permet de revenir sur la distinction entre les deux concepts, transformation et réaction chimiques (Tr1). Moins de la moitié des enseignants interrogés évoque la distinction entre transformation et réaction lors de l'évolution d'un système (Tr2) ou de l'arrêt de l'évolution (Tr3). Les enseignants sont presque unanimes à dire que les élèves ne comprennent pas bien la distinction entre transformation et réaction (Tr4). Six enseignants ajoutent spontanément que cette distinction n'est pas claire pour eux et dix reconnaissent aussi spontanément que lors d'explications orales ils disent réaction au lieu de transformation. Au total, quatorze enseignants font part d'un problème de distinction entre les deux termes ; un seul enseignant n'évoque pas ce problème mais ses

propos montrent qu'il confond ces deux termes. Par exemple, en réponse à la question « vos élèves ont-ils des difficultés à expliquer pourquoi une transformation s'arrête ? » il utilise l'expression « la réaction s'arrête » à propos de l'état d'équilibre d'un système.

code	Catégories de réponses	Nb
Tr1	L'introduction des transformations non totales permet de « réactiver » la distinction entre transformation et réaction	0
Tr2	Deux réactions inverses pour expliquer l'évolution du système	7
Tr3	Deux réactions inverses pour expliquer l'arrêt d'une transformation non totale	5
Tr4	Les élèves ne comprennent pas bien la différence entre transformation et réaction	12
Tr5	L'enseignant ne comprend pas bien la différence entre transformation et réaction	6
Tr6	L'enseignant confond parfois transformation et réaction dans son discours	10
Tr7	La confusion entre transformation et réaction ne gêne pas la compréhension des élèves	8
Tr8	Cas où la confusion transformation réaction est gênante	4

Tableau 4 • **catégorisation des propos des enseignants sur le thème transformation et réaction**

Huit enseignants pensent que la confusion entre les deux notions n'affecte pas la compréhension que les élèves peuvent avoir des phénomènes chimiques (Tr7). Un seul enseignant signale que l'arrêt d'une transformation non totale (qu'on interprète par deux réactions inverses l'une de l'autre) constitue un cas où cette confusion est gênante, puisqu'elle conduit à des contradictions. La confusion s'avère gênante pour d'autres enseignants lorsque les élèves en viennent à modifier les quantités mises en jeu afin qu'elles soient égales ou proportionnelles aux nombres stœchiométriques.

Certains enseignants proposent des explications aux difficultés qu'éprouvent les élèves à comprendre la distinction entre transformation et réaction. Cinq enseignants considèrent que l'accent n'est pas mis sur cette distinction : « on n'insiste pas », « on joue sur la subtilité là » ou « ça n'est pas une obligation en soi ». Quatre autres pensent que l'accent est mis sur le concept de réaction parce qu'il est plus utile, parce qu'il permet de faire des exercices : « les élèves ont l'impression très rapidement que ce qui va être important c'est de travailler avec la réaction », à partir de laquelle « je vais pouvoir traiter un exercice » précise l'un d'entre eux. Un autre dit passer très rapidement de la transformation à la réaction parce que son but c'est d'« écrire l'équation de la réaction, dresser un tableau d'avancement, calculer un x_{max} et puis faire des calculs avec ». Le dernier déclare que « la base c'est l'équation de réaction » sans qu'il soit nécessaire de parler de transformation, qui est mise en « surcouche après » et qui n'est pas un « critère important pour la résolution de l'exercice ».

On voit donc que la distinction entre transformation et réaction n'est pas ressentie comme un enjeu du programme par la plupart des enseignants interrogés.

L'introduction de l'évolution des systèmes chimiques et du critère d'évolution est-elle perçue comme un enjeu ?

Les programmes de physique et chimie ici étudiés présentent la particularité d'avoir pour la première fois un même fil directeur, l'évolution temporelle des systèmes. Nous attendions que les enseignants y fassent allusion en soulignant la place consacrée à l'évolution des systèmes. Moins de la moitié des enseignants interrogés ont fait une déclaration

- sur l'intérêt d'introduire l'évolution des systèmes chimiques : « On est plus explicatif, on veut faire comprendre aux élèves qu'il y a des évolutions tandis que (.) dans les anciens programmes, on bazardait une série de calculs »

- ou sur le nouveau statut de l'état d'équilibre, vu comme le terme d'une évolution : « On parle sans arrêt d'évolution, on a un état initial, alors on veut aller vers un état d'équilibre, le système va évoluer ».

En fait lorsque les enseignants parlent d'évolution des systèmes, c'est pour évoquer le critère d'évolution. Ils utilisent de façon très courante le critère d'évolution pour les situations préconisées par le programme (Cr5, Cr6, Cr8). Sept enseignants explicitent l'intérêt qu'ils voient à l'utilisation de ce critère : quelle que soit l'évolution envisagée la règle à appliquer est la même. Deux soulignent la différence avec ce qui se faisait dans l'ancien programme où il fallait raisonner sur la valeur de la constante d'équilibre dans le cas de transformations acido-basiques et par comparaison des potentiels standard en oxydoréduction.

code	Catégories de réponses	Nb
Cr1	mention de l'évolution des systèmes chimiques de façon générale	3
Cr2	l'état d'équilibre chimique vu comme terme de l'évolution du système.	5
Cr3	évolution du système évoquée avec le critère d'évolution	12
Cr4	cas limites d'utilisation du critère d'évolution pas mentionnés	9
Cr5	utilisation du critère pour prévoir l'évolution quand toutes les espèces sont présentes initialement	15
Cr6	utilisation du critère d'évolution pour prévoir lorsque seuls les réactifs sont présents	14
Cr7	utilisation du critère d'évolution pour prévoir lorsqu'une seule espèce est manquante	3
Cr8	utilisation du critère pour justifier une absence d'évolution	13

Tableau 5 • **propos tenus par les enseignants sur le thème évolution et critère**

L'utilisation très fréquente du critère d'évolution ne signifie pas que les limites d'application en soient connues. Neuf enseignants déclarent ne pas en parler aux élèves ; peu d'enseignants fournissent un exemple de cas limite. Cependant face à une réponse d'élève (R2) dans une situation où l'application du critère d'évolution pose problème, un peu plus de la moitié (8) des enseignants interrogés repère que dans ce cas le critère d'évolution est mis en défaut.

Ces résultats permettent de dire que l'introduction du critère d'évolution est perçue comme un enjeu du programme, l'utilisation du critère étant bien ancrée et appréciée.

Les enseignants privilégient-ils un modèle à un autre pour interpréter l'état d'équilibre chimique ?

Pour caractériser l'état d'équilibre chimique, les enseignants utilisent plus volontiers le modèle thermodynamique (Eq1) ou des éléments du modèle cinétique macroscopique (Eq2) que le modèle cinétique microscopique (Eq3).

code	catégories de réponses	Nb
Eq1	état d'équilibre et quotient de réaction	12
Eq2	état d'équilibre et réactions inverses	11
Eq3	état d'équilibre et chocs efficaces	5
Eq4	la réaction chimique ou la vitesse de réaction considérée comme un concept microscopique	12
Eq5	la vitesse de réaction est une grandeur macroscopique	14
Eq6	les chocs efficaces correspondent au plan microscopique	12
Eq7	l'explication de l'état d'équilibre au plan microscopique n'est pas enseignée	6

Tableau 6 • **propos tenus par les enseignants sur le thème équilibre et modèles**

En commentant des réponses d'élèves (R3, R4 et R5), la plupart des enseignants déclarent qu'il est indispensable, pour expliquer l'arrêt de la transformation, de calculer le quotient de réaction dans l'état final du système et de montrer qu'il est égal à la constante d'équilibre (Eq1). Huit parmi eux déclarent ne pas attendre de justification cinétique. Seuls deux enseignants disent souhaiter une réponse cinétique sans évoquer le quotient de réaction « moi ce que je demande finalement c'est que deux réactions continuent à se faire, surtout pas dire qu'il se passe plus rien ». Ces déclarations peuvent étonner dans la mesure où elles surviennent alors que les enseignants viennent d'examiner trois réponses d'élèves où ne figuraient que des arguments cinétiques, et qu'eux-mêmes utilisent assez

volontiers ce type d'argument (Eq2). Cependant, si l'on se reporte aux compétences exigibles figurant dans le programme (cf. § 3.2.2 et 3.2.3), ces déclarations sont moins surprenantes.

Douze enseignants considèrent comme satisfaisante la réponse R6 dans laquelle l'élève situe la réaction chimique et la vitesse de réaction au plan microscopique. L'analyse de leurs propos permet de dire qu'onze d'entre eux partagent le point de vue exprimé dans cette réponse (on peut dire de même du douzième à propos d'une autre réponse d'élève). Ce n'est qu'après une question fermée que la plupart des enseignants placent correctement la vitesse de réaction au niveau macroscopique (Eq5) et reconnaissent que la mention du niveau microscopique implique une référence aux chocs efficaces entre particules (Eq6). À la suite de cette mise au point, six enseignants précisent qu'ils ne traitent pas la partie du programme relative à l'interprétation microscopique de l'état d'équilibre (Eq7). Huit autres enseignants signalent que cette interprétation est peu utilisée.

Distinguer les niveaux macroscopique et microscopique ne parait pas constituer un objectif important : quatre enseignants jugent que « dire la réaction continue dans un sens et dans l'autre, c'est déjà pas mal », alors que six autres se satisfont de l'opposition qui est faite entre ce qu'on voit et ce qu'ils disent être la réalité « il se passe bien quelque chose malgré qu'on ne voit rien quoi ».

Ainsi, pour interpréter un état d'équilibre chimique, la plupart des enseignants interrogés privilégient l'utilisation du modèle thermodynamique et n'attachent pas une grande importance aux modèles cinétiques.

Ces éléments nous conduisent à dire que la définition de l'état d'équilibre comme état dans lequel le quotient de réaction est égal à la constante d'équilibre constitue un enjeu pour les enseignants alors que savoir parler du caractère dynamique de cet état à l'aide des modèles cinétiques n'est pas une nécessité pour la plupart des enseignants interrogés.

6.2 Quelles difficultés des élèves les enseignants connaissent-ils ?

Présentation générale des résultats

Le tableau 7 présente les difficultés et erreurs associées que nous avons identifiées à partir de questionnaires, ainsi que le nombre d'enseignants les ayant évoquées au cours de l'entretien (colonne C) ou les ayant repérées dans une réponse d'élève (colonne I). Une case grisée

indique que l'erreur ne figurait pas dans les réponses d'élèves proposées aux enseignants.

Difficultés à		C	Erreurs associées		C	I
Comprendre la distinction entre transformation totale et non totale	D1	6	L'avancement final est toujours égal à l'avancement maximal	E1	1	
Concevoir une transformation dans le sens inverse de l'équation chimique	D2	5	Le sens d'évolution est toujours le sens direct	E2	3	1
Exprimer le quotient de réaction	D3	1	Omettre la concentration d'un soluté absent dans l'expression du quotient	E3	0	13
			Introduire la concentration d'un solide ou du solvant dans l'expression du quotient	E4	8	
Expliquer pourquoi une transformation non totale s'arrête	D4	11	Ne pas calculer le quotient de réaction pour justifier l'état d'équilibre du système	E5	0	11
Concevoir la simultanéité des réactions inverses	D5	1	Les réactions inverses sont successives	E6	0	10
Comprendre la distinction entre transformation et réaction	D6	11	Utiliser un mot pour l'autre (réaction pour transformation ou l'inverse)	E7	3	6
			Nier l'arrêt de la transformation	E8	0	5
Situer le concept de réaction chimique au plan macroscopique	D7	0	La réaction chimique est un concept microscopique	E9	0	0
Concevoir la présence de « produits » dans l'état initial	D8	9	Écrire une concentration nulle pour des « produits » présents dans l'état initial	E10	3	

Tableau 7 • **Difficultés citées (C) et erreurs citées (C) ou identifiées (I) par les enseignants (N=15).**

Difficultés et erreurs mentionnées par les enseignants

Certains contenus disciplinaires ne sont pas, ou sont très peu, considérés par les enseignants comme suscitant des difficultés d'apprentissage : il s'agit de D5 « concevoir la simultanéité des réactions inverses » et de D7 « situer le concept de réaction chimique au plan macroscopique ».

Deux autres difficultés, D1 et D2 (et les erreurs associées E1 et E2), sont évoquées de façon spontanée par moins de la moitié des enseignants interrogés. Ces deux points « Comprendre la distinction entre transformation totale et non totale » et « concevoir une transformation dans le sens inverse de l'équation chimique » peuvent être considérés comme des modifications de conceptions essentielles pour aborder le concept

d'équilibre chimique (Van Driel *et al.*, 1998). Cependant moins de la moitié des enseignants interrogés mentionne que ces deux points peuvent être problématiques pour les élèves.

Les autres difficultés ou erreurs associées (E4, D4, D6, D8) sont mentionnées par plus de la moitié des enseignants en réponse à une question qui attire leur attention sur cet aspect. Ainsi, plus de la moitié des enseignants interrogés estime qu'il arrive à certains élèves « d'introduire la concentration d'un solide ou du solvant dans l'expression du quotient de réaction », d'avoir des difficultés « à expliquer pourquoi une transformation chimique s'arrête », « à comprendre la distinction entre transformation et réaction chimiques » et « à concevoir qu'il puisse y avoir des produits dans l'état initial. Les enseignants ont été assez nombreux à signaler cette dernière difficulté (D8), qui se traduit d'après trois d'entre eux par une tendance à écrire que les concentrations des « produits » sont nulles dans l'état initial (E10). Cette erreur ne figure pas dans les erreurs à identifier car nous ne l'avons pas relevée dans les réponses à nos questionnaires. Cela peut signifier que les enseignants l'ont détectée, ont su trouver les arguments pertinents de sorte que les élèves ont surmonté la difficulté et ne font plus cette erreur. Deux enseignants expliquent comment ils ont résolu la difficulté avec leurs élèves : « moi ça m'amuse quand ils me disent, "madame, vous avez pas le droit de mélanger." Ah bon si je prends le flacon ça me saute à la figure ? », « on a bien vu qu'il suffit de mettre les deux solutions au départ donc y avait pas de problème ».

Avec ou sans humour, tous deux ont eu recours au même argument consistant à revenir à la réalisation pratique.

Pour résumer, les enseignants sont conscients de certaines difficultés ou erreurs des élèves, telles que « concevoir une transformation dans le sens inverse », « exprimer le quotient de réaction », « expliquer l'arrêt d'une transformation », « distinguer transformation et réaction » ; alors que d'autres, telles que « concevoir la simultanéité des réactions inverses » et « situer le concept de réaction chimique au plan macroscopique » leur semblent inconnues.

Identification des erreurs dans les réponses d'élèves

Certaines erreurs n'ont pas été identifiées (E2, E9), d'autres l'ont été par moins de la moitié des enseignants interrogés (E7, E8), tandis que les trois dernières (E3, E5, E6) l'ont été par plus de la moitié des enseignants interrogés. Les contenus disciplinaires concernés correspondent-ils aux contenus disciplinaires cités précédemment (cf. § 6.2.2) comme pouvant poser problème aux élèves ?

Dans le tableau 8, nous indiquons si une difficulté ou une erreur relative à un contenu disciplinaire précis a été mentionnée ou pas et si une erreur portant sur le même contenu disciplinaire a été identifiée dans les réponses d'élèves.

Dans le discours	Devant une réponse d'élèves	Exemple
Difficulté ou erreur associée mentionnée	Erreur identifiée	D4-E5
	Erreur non (ou peu) identifiée	D2-E2, D6-E7, D6-E8
Difficulté et erreur associée non mentionnées	Erreur identifiée	D3-E3, D5-E6
	Erreur non identifiée	D7-E9

Tableau 8 • **mise en rapport de l'identification des erreurs avec la mention des difficultés**

Dans le premier cas (D4-E5), les enseignants sont nombreux à mentionner la difficulté et à identifier une erreur liée à cette difficulté : ainsi, en réponse à une question, la plupart des enseignants (11) disent que les élèves ont du mal à expliquer pourquoi une transformation non totale s'arrête (D4), ils sont aussi nombreux à s'étonner que dans une réponse d'élève il ne soit pas fait mention du calcul du quotient de réaction dans l'état final pour montrer que le système est en état d'équilibre chimique (E5) alors que toutes les données nécessaires figuraient dans l'énoncé.

Dans le second cas (D2-E2, D6-E7, D6-E8), les enseignants déclarent que les élèves rencontrent des difficultés sur ces sujets mais n'identifient pas une erreur liée à ces difficultés ou sont peu nombreux à le faire. Bien que les enseignants puissent être nombreux à mentionner une difficulté, ils ne reconnaissent pas en aussi grand nombre les erreurs associées. Moins de la moitié d'entre eux reconnaît dans les réponses R3 et R4 des erreurs liées à la distinction entre transformation et réaction chimiques (D6) : l'utilisation du terme transformation au lieu de réaction dans l'une (E7), la négation de l'arrêt de la transformation à l'équilibre dans l'autre (E8). Peu nombreux à mentionner la difficulté à « concevoir une transformation dans le sens inverse de l'équation » (D2), les enseignants ne remarquent pas l'erreur correspondante dans la réponse R5.

Dans le troisième cas (D3-E3, D5-E6), les enseignants ne parlent pas des difficultés que les élèves éprouveraient ou d'erreurs qu'ils commettraient, mais ils sont nombreux à identifier une erreur relative à ces contenus dans une réponse d'élève. Ainsi, bien qu'aucun enseignant n'ait parlé de difficulté à propos de l'écriture du quotient de réaction (D3) ou de la simultanéité des réactions inverses (D5), ils sont nombreux à identifier les erreurs dans les réponses d'élèves. La quasi totalité (13) d'entre eux identifie dans la réponse R1 l'erreur (E3) consistant à omettre dans l'expression du quotient de réaction la concentration du soluté absent. Et les deux tiers

des enseignants interrogés (10) remarquent l'erreur de l'élève (R5) pour lequel la réaction inverse n'a lieu qu'après la réaction directe (E6).

Dans le dernier cas (D7-E9), les enseignants ne mentionnent pas que les élèves peuvent éprouver une difficulté et n'identifient pas l'erreur associée dans une réponse d'élève. L'absence de mention d'une difficulté et d'identification de l'erreur liée (D7-E9) met l'accent sur le thème « réaction chimique concept macroscopique et non microscopique » qui pose une difficulté aux enseignants.

6.3 Impact de la présentation de réponses d'élèves

La présentation de réponses d'élèves comportant des erreurs peut avoir différents effets. Elle permet à certains enseignants de prendre conscience de difficultés de compréhension des élèves qu'ils n'avaient pas rencontrées. Elle révèle parfois des difficultés conceptuelles chez les enseignants eux mêmes. Elle peut être également l'occasion d'une réflexion plus approfondie sur les raisons de certaines difficultés rencontrées par les élèves et les manières de les surmonter.

Faire prendre conscience aux enseignants de certaines difficultés des élèves

La présentation de réponses d'élèves permet à certains enseignants de prendre conscience d'erreurs d'élèves qu'ils n'avaient pas encore rencontrées, si le contenu disciplinaire ne leur pose pas de problème (D3-E3, D5-E6). En effet plusieurs enseignants ont déclaré n'avoir jamais rencontré l'erreur figurant dans la réponse R1, où l'élève modifie l'expression du quotient de réaction en enlevant la concentration du « produit » soluté absent au lieu d'écrire qu'elle est nulle. Cela participe à l'augmentation de leur connaissance du contenu pédagogique (PCK) dans la mesure où la connaissance d'erreurs commises par les élèves permet aux enseignants d'anticiper et de trouver des arguments appropriés, nous l'avons vu dans le cas de la présence initiale des « produits » (D8-E10).

Révéler les difficultés conceptuelles d'enseignants

La présentation de réponses d'élèves met également en évidence des difficultés conceptuelles de la part des enseignants.

Ainsi, lors de l'examen de la réponse R5 dans laquelle l'élève écrit que la réaction inverse n'a lieu qu'après la réaction directe, manifestant ainsi une conception pendulaire de l'état d'équilibre (Barlet & Plouin, 1994),

un enseignant fait part de sa perplexité « l'élève aurait-il raison ? », « je me pose jamais la question en fait ». Un autre déclare « ce que je dis (.) c'est que la réaction va évoluer dans un sens avec une certaine vitesse puis dans l'autre sens avec la même vitesse », exprimant ainsi lui même une conception pendulaire de l'état d'équilibre.

De même, la réponse R6 qui situe les notions de réaction et de vitesse de réaction à l'échelle microscopique a suscité l'approbation de 12 enseignants : « elle est vraiment très intéressante, enfin je veux dire moi j'ai pas grand chose à dire sur une phrase comme ça ».

« j'aurais écrit également cependant à l'échelle microscopique la réaction continue ».

Mais après une question portant sur le caractère macroscopique de la vitesse de réaction (cf. § 6.1.3), la plupart d'entre eux reconnaissent que les propos de l'élève sont erronés.

Favoriser la réflexion à propos des difficultés d'apprentissage

Au cours des entretiens, certains enseignants se sont engagés dans une réflexion sur les raisons d'une difficulté ou la manière de la surmonter. Donnons en quelques exemples.

Un enseignant reconnaît qu'il n'a pas vu l'erreur dans la réponse R6 (où l'élève place au plan microscopique des éléments du modèle macroscopique) parce que « on parle d'énormément de choses et on finit par habitude par dire des choses d'un point de vue utilitaire en pensant aux exercices (.) que les élèves vont résoudre et on oublie un petit peu ce genre de détail qui est très important bien sûr ». Se focaliser sur la résolution des exercices peut conduire à ne pas relever le manque de rigueur de certaines expressions, selon cet enseignant. Ce manque de rigueur peut ensuite générer des difficultés chez les élèves.

Face à la réponse R4 où l'élève emploie le terme transformation au lieu de réaction, un enseignant (E) exprime un doute sur la façon dont la réponse est formulée et déclare qu'il va essayer de la corriger, puis il reprend le terme transformation comme l'élève. L'auteur (I) de l'entretien le questionne alors à ce propos.

I : « vous diriez transformation ? »
E : « je dirais transformation »
I : « parce que tout à l'heure vous m'avez dit transformation c'est passage d'un état du système à un autre »
E : « oui »
I : « or là c'est le même état »

I : « oui c'est le même état voyez j'aurais dit transformation aussi, *(rire)* comme quoi même moi j'amalgame le vocabulaire, ça c'est sûr. C'est pas évident. »

Dire que le système est dans le même état, permet à l'enseignant de prendre conscience que l'emploi qu'il fait du terme transformation va à l'encontre de la définition qu'il a lui-même donné au préalable.

En commentant la réponse R3, dans laquelle l'élève contredit l'énoncé en écrivant que la transformation ne cesse pas, un enseignant approuve en déclarant qu'il y a « *transformation d'espèces chimiques* ». À la question sur la définition d'une transformation chimique donnée en cours, il ne répond pas directement et lit le document qu'il donne à ses élèves en début de terminale.

« Ah alors transformation chimique : observation macroscopique d'un système chimique évoluant d'un état initial à un état final, voilà ce que je leur ai donné comme définition [...] effectivement si la transformation c'est une observation macroscopique et que moi je te dis que c'est au niveau microscopique que ça se passe, la transformation chimique ne cesse pas c'est faux. »

Dans ce cas, il lui faut revenir à la définition de la transformation comme observation macroscopique pour convenir que la formulation employée par l'élève est incorrecte.

Un autre enseignant revient spontanément, en fin d'entretien, sur la difficulté qu'il a eu à faire la distinction entre les deux notions, transformation et réaction, dans les réponses d'élèves et manifeste l'intention d'être plus attentif à l'avenir.

« Très honnêtement s'il me fallait noter des réponses d'élèves et puis dire non là c'est faux l'élève aurait dû répondre, aurait dû écrire réaction et là transformation, c'est ce qui m'a le plus gêné dans les réponses que j'ai eu à donner (.) Dans mon enseignement [...] j'ai pas ce soin de faire à l'oral la distinction entre transformation et réaction. Je crois que je vais me poser le problème de manière plus aiguë maintenant. »

Nous venons de voir que l'utilisation du terme transformation chimique n'est pas bien maîtrisée par tous les enseignants. L'introduction récente de ce terme par le programme de la classe de seconde (septembre 2000) vise à préciser la signification du terme de réaction chimique qui mêlait ce qui relève du modèle (réaction chimique) et ce qui relève du registre empirique (transformation chimique). Par ailleurs le mot « transformation » n'est pas spécifique du langage chimique. Comme le fait remarquer un enseignant, l'utiliser implique pour les enseignants expérimentés d'aller à l'encontre de leurs habitudes « ça pose davantage de problèmes aux enseignants un peu anciens parce qu'ils ont été habitués à parler juste de

la réaction chimique qui représentait à la fois la transformation, l'équation etc. ». Nous reprenons à notre compte cette réflexion en ajoutant qu'il est possible que cette habitude concerne un certain nombre d'enseignants, qu'ils soient confirmés ou non. En effet, nous avons comparé le nombre d'enseignants confirmés et le nombre d'enseignants non confirmés, ayant identifié les erreurs liées à une mauvaise compréhension des deux concepts transformation et réaction (E7-E8). Trois enseignants confirmés (sur 10) et un non confirmé (sur 5) relèvent les deux erreurs, deux enseignants confirmés et deux non confirmés en identifient une sur les deux.

CONCLUSION

À partir de l'analyse des programmes et documents d'accompagnement, nous avons caractérisé quelques enjeux de ces nouveaux programmes, et les difficultés d'apprentissage des élèves (Kermen, 2007). Dans cette étude, il s'agissait d'analyser les savoirs professionnels des enseignants : leur perception de ces enjeux et leur maîtrise conceptuelle à ce sujet d'une part, leur connaissance des difficultés des élèves d'autre part.

À l'issue de cette étude, il apparaît que l'introduction du critère d'évolution est bien ressentie comme un enjeu du programme par les enseignants interrogés, vraisemblablement parce qu'il fait l'objet de contenus et compétences exigibles claires et qu'il donne lieu à une procédure algorithmique facile à présenter et à mémoriser. Les limites d'utilisation du critère sont moins bien connues, ce qui n'est pas étonnant dans la mesure où cette notion intervient pour la première fois dans les programmes d'enseignement à ce niveau d'étude. Mais la plupart des enseignants sont conscients des difficultés des élèves liées à ce thème ou parviennent à repérer les erreurs associées, faisant ainsi preuve d'un accroissement de leur connaissance pédagogique du contenu.

Les deux autres thèmes ne sont pas ressentis comme des enjeux pour des raisons différentes.

Pour le thème transformation et réaction, plusieurs aspects peuvent entrer en ligne de compte. D'une part le libellé du programme de terminale n'insiste pas avec suffisamment de précision sur le nouveau relief apporté à la distinction entre transformation et réaction par l'introduction des transformations non totales. D'autre part l'incompréhension de la distinction conjuguée à l'habitude qui prévalait dans les programmes antérieurs de ne pas envisager cette distinction conduit un certain nombre d'enseignants à ne pas s'en préoccuper. Enfin les enseignants privilégient la résolution d'exercices, sans relier systématiquement cette pratique

écrite, symbolique, à des faits expérimentaux qu'ils devraient chercher à expliquer ou à prévoir.

Pour le thème équilibre et modèles, les enseignants privilégient le modèle thermodynamique auquel correspondent des compétences exigibles précises. La plupart n'accordent pas grande importance aux explications cinétiques mentionnant l'égalité des vitesses de réaction ou les chocs efficaces entre particules, explications qui ne font pas l'objet de compétences exigibles, certains professeurs en viennent même à ne pas enseigner le modèle cinétique microscopique. Ne jugeant pas utile de traiter ces modèles ou n'ayant pas l'habitude de les utiliser, la plupart des enseignants se satisfont d'explications peu rigoureuses mêlant le macroscopique et le microscopique.

Pour en revenir aux intentions didactiques exprimées par les auteurs du programme, il apparaît que l'introduction d'un critère d'évolution des systèmes à caractère général, est bien perçue et appréciée. Par contre le désir des auteurs du programme de bien marquer la différence entre faits expérimentaux et modèles, qui s'est traduit notamment par la distinction entre les notions de transformation et de réaction chimiques et l'appel à un double regard macroscopique et microscopique, n'est pas bien compris par la plupart des enseignants interrogés. Une traduction insuffisante de ces intentions dans les instructions officielles, des habitudes de raisonnement anciennes, une prépondérance accordée aux exercices permettent de comprendre pourquoi.

Nous avons vu également que certaines difficultés des élèves sont connues des enseignants, d'autres moins. La présentation de réponses d'élèves a permis à certains enseignants de prendre conscience de difficultés des élèves qu'ils n'avaient pas repérées, de réfléchir à leurs causes possibles, à d'autres de prendre conscience de leurs propres difficultés conceptuelles.

Ces résultats permettent de proposer un canevas à trois composantes pour une formation d'enseignants. La première composante porterait sur le contenu disciplinaire afin de préciser :

— les conséquences de l'utilisation des notions de transformation et réaction lorsqu'on parle de l'évolution des systèmes chimiques et d'état d'équilibre chimique,

— le contenu des modèles, en particulier les modèles cinétiques macroscopique et microscopique,

— les limites du critère d'évolution.

Cette composante devrait être liée à une formation épistémologique précisant le rôle, les limites, le champ d'application des modèles utilisés et leurs relations avec le registre empirique. Enfin ces deux composantes

seraient menées en liaison avec une étude des difficultés des élèves. Il s'agit de permettre aux enseignants de comprendre ces difficultés pour qu'ensuite ils trouvent des arguments pertinents et proposent des situations pédagogiques favorisant le dépassement de ces difficultés, faisant ainsi preuve d'un accroissement de leur connaissance du contenu pédagogique (PCK).

BIBLIOGRAPHIE

BARDIN L. (1993). *L'analyse de contenu.* Paris, Presses Universitaires de France.

BARLET R. & PLOUIN D. (1994). L'équation-bilan en chimie, un concept intégrateur source de difficultés persistantes. *Aster,* n° 18, p. 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.* Dordrecht, Kluwer Academic Publishers, p. 147-162.

CHIU M.-H., CHIN-CHENG C. & CHIA-JU L. (2002) Dynamic processes of conceptual change: analysis of constructing mental models of chemical equilibrium, *Journal of Research in Science Teaching*, vol. 39, n° 8, p. 688-712.

COUCHOURON M., VIENNOT L. & COURDILLE J.-M. (1996). Les habitudes des enseignants et les intentions didactiques des nouveaux programmes d'électricité en classe de quatrième. *Didaskalia*, n° 8, p. 81-96.

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*, vol. 96, n° 846, p. 21-30.

DAVOUS D., DUMONT M., FÉORE M.-C., FORT L., GLEIZE R., MAUHOURAT M.-B., ZOBIRI T. & JULLIEN L. (2003). Les nouveaux programmes de chimie au lycée. *l'Actualité Chimique*, février 2003, p. 31-44.

DE JONG O. (1998). Points de vue de professeurs et de futurs professeurs de chimie concernant l'enseignement de la combustion. *Aster*, n° 26, p. 183-205.

DE JONG O. (2003). Exploring science teachers' pedagogical content knowledge. In D. PSILLOS *et al.* (éd.), *Science education research in the knowledge – based society.* Dordrecht, Kluwer Academic Publishers, p. 373-381.

GESS-NEWSOME J. (1999). Pedagogical content knowledge : an introduction and orientation. In J. GESS-NEWSOME & N. G. LEDERMAN (éd.), *Examining Pedagogical Content Knowledge.* Dordrecht, Kluwer Academic Publishers, p. 3-20.

GOFFARD M. (1994). Des programmes de chimie à leur mise en œuvre. *Didaskalia*, n° 3, p. 129-137.

GUSSARSKY E. & GORODETZKY M. (1990). On the concept "chemical equilibrium": the associative framework, *Journal of Research in Science Teaching*, vol. 27, n° 3, p.197-204.

HIRN C. (1995). Comment les enseignants de sciences physiques lisent-ils les intentions didactiques des nouveaux programmes d'optique de classe de quatrième ? *Didaskalia*, n° 6, p. 39-54.

KERMEN I. (2007) *Prévoir et expliquer l'évolution des systèmes chimiques.* Thèse de doctorat, université Paris-Diderot-Paris7.

LARCHER C. (1994) Étude comparative de démarches de modélisation. Quelles sont les caractéristiques des démarches de modélisation ? In *Nouveaux regards sur l'enseignement et l'apprentissage de la modélisation en sciences*, Paris, INRP, p. 9-24.

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 en classe de seconde (15-16 ans), *Chemistry Education: Research And Practice In Europe*, vol. 1, n° 1, p. 61-75.

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.* Dordrecht, Kluwer Academic Publishers, p. 95-132.

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

MÉHEUT M. & CHOMAT A. (1990) Les limites de l'atomisme enfantin ; expérimentation d'une démarche d'élaboration d'un modèle particulaire par des élèves de collège, *European Journal of Psychology of Education,* vol. 5, n° 4, p. 417-437.

MINISTERE DE L'ÉDUCATION NATIONALE (1995) *Bulletin Officiel de l'Éducation Nationale*, spécial n° 3, Paris.

MINISTERE DE L'ÉDUCATION NATIONALE (1999) *Bulletin Officiel de l'Éducation Nationale*, hors série n° 6, Paris.

MINISTERE DE L'ÉDUCATION NATIONALE (2001) *Bulletin Officiel de l'Éducation Nationale*, hors série n° 4, Paris.

MINISTERE DE L'ÉDUCATION NATIONALE (2002a) *Bulletin Officiel de l'Éducation Nationale*, n° 27, Paris.

MINISTERE DE L'ÉDUCATION NATIONALE (2002b) *Accompagnement de programme – Chimie – classe terminale scientifique*. Paris, CNDP.

MORGE L. (2003) les connaissances professionnelles locales : le cas d'une séance sur le modèle particulaire, *Didaskalia*, n° 23, p. 101-131.

PEDROSA A. & DIAS H. (2000) Chemistry textbook approaches to chemical equilibrium and student alternative conceptions *Chemistry Education : Research And Practice In Europe*, vol. 1, n° 2, p. 227-236.

SHULMAN L. S. (1986). Those who understand: knowledge growth in teaching. *Educational Researcher*, vol. 15, n° 2, p. 4-14.

SHULMAN L. S. (1987). Knowledge and Teaching: foundations of the new reform, *Harvard Educational Review*, vol. 57, n° 1, p. 1-22.

SHULMAN L. S. (1999). Foreword. In J. GESS-NEWSOME & N. G. LEDERMAN (éd.), *Examining Pedagogical Content Knowledge.* Dordrecht, Kluwer Academic Publishers, p. 9-12.

STAVRIDOU H. &SOLOMONIDOU C. (2000) Représentations et conceptions des élèves grecs par rapport au concept d'équilibre chimique, *Didaskalia,* n° 16, p.107-134.

STRAUSS A.L. & CORBIN J. (1990). *Basics of Qualitative Research. Grounded Theory Procedures and Techniques*. Newbury Park, Sage.

TIBERGHIEN A., PSILLOS D. & KOUMARAS P. (1995). Physics instruction from epistemological and didactical bases, *Instructional Science*, n° 22, p. 423-444.

VAN DRIEL J. H., VERLOOP N. & DE VOOS W. (1998). Developing science teachers' pedagogical content knowledge. *Journal of Research in Science Teaching*, vol. 35, n° 6, p. 673-695.

VIDAL C. & LEMARCHAND H. (1988) *La réaction créatrice, dynamique des systèmes chimiques*, Paris, Hermann.

VIENNOT L., CHAUVET F., COLIN P. & REBMANN G. (2005). Designing strategies and tools for teacher training : the role of critical details, examples in optics. *Science Education*, vol. 89, n° 1, p. 13-27.

WALLISER B. (1977) *Systèmes et modèles*, Paris, Éditions du Seuil.

ANNEXE 1 :

PROTOCOLE D'ENTRETIEN

Je mène une recherche sur la mise en place du programme de terminale S en chimie. J'aimerais en discuter avec vous.

1.1- Pensez-vous que vos élèves ont ressenti des difficultés lors des parties B et C (après la cinétique) du programme ? Lesquelles ?

1.2- Avez-vous relevé des erreurs fréquentes ?

2.1- À votre avis pourquoi a-t-on changé la façon d'introduire l'équilibre chimique ?

2.2- Qu'est-ce que ça apporte ?

3.1- À votre avis, les élèves comprennent-ils bien la distinction entre transformation chimique et réaction chimique ?

3.2- Est-ce qu'il y a des situations où cette confusion est gênante pour leur compréhension ?

3.3- Vos élèves ont-ils des difficultés à expliquer pourquoi une transformation s'arrête ?

4.1- Est-ce que vos élèves éprouvent des difficultés à exprimer le quotient de réaction ? Est-ce qu'il y a des situations qui peuvent poser problème ?

4.2- Lorsque vous introduisez le critère d'évolution d'un système chimique, est-ce que vous évoquez d'éventuels problèmes d'application ou limites d'utilisation ?

5– Quelles situations d'utilisation du critère d'évolution proposez-vous à vos élèves ? Voici un document écrit avec différentes situations, vous me dites à chaque fois si vous avez proposé la situation et si vos élèves ont manifesté des difficultés particulières.

5.1– Toutes les espèces sont présentes initialement et on demande de prévoir comment le système chimique va évoluer.

5.2– Seuls les « réactifs » sont présents initialement et on demande de prévoir si le système chimique va évoluer.

5.3– Une seule espèce est manquante initialement et on demande de prévoir si le système chimique va évoluer.

5.4– On demande de justifier que le système chimique n'évolue pas.

5.5– Il est possible de faire une prévision d'évolution par un raisonnement qualitatif sans faire intervenir le quotient de réaction.

6– Dans cette partie de notre entretien je vais vous montrer quelques réponses d'élèves à propos de situations chimiques que je leur ai présentées. J'aimerais avoir votre avis sur ces réponses.

6.1a– On réalise différents mélanges d'espèces chimiques. On donne les quantités de matière, le volume du mélange. On se demande si la composition du système va changer.

(Présenter l'une après l'autre les deux réponses d'élèves R1 et R2.)

Qu'en pensez-vous ?

À votre avis à quoi est dû ce type d'erreur ? (s'il reconnaît l'erreur)

6.1b– Dans le cas où l'une des espèces figurant dans l'équation chimique est absente initialement, peut-on toujours dire qu'il y a évolution dans le sens qui forme cette espèce ?

6.2- Je voudrais avoir votre avis maintenant sur un deuxième type de situation. On considère un système chimique ayant évolué jusqu'à un état final où toutes les espèces sont encore présentes. La transformation chimique est donc terminée et n'est pas totale.

6.2a– Que pensez-vous de ces réponses d'élève ?

(Présenter l'une après l'autre les réponses d'élèves R3, R4 et R5.)

Quelle réponse attendez-vous pour expliquer qu'il n'y a plus d'évolution ?

6.2b– Que pensez-vous de cette réponse d'élève ?

(Présenter la réponse R6.)

Si le commentaire ne porte pas sur la contradiction entre microscopique et les arguments utilisés : la vitesse de réaction est-elle une grandeur macroscopique ou microscopique ?

6.2c Les chocs efficaces entre particules sont-ils au niveau microscopique ?

Après la discussion que nous venons d'avoir, est-ce qu'il y a un point sur lequel vous aimeriez ajouter quelque chose ?

ANNEXE 2 :

LES RÉPONSES D'ÉLÈVES

La première *réponse R1* a été proposée par un élève à propos de la situation suivante :

Soit l'équation chimique $Ag^{+}_{(aq)} + Fe^{2+}_{(aq)} = Ag_{(s)} + Fe^{3+}_{(aq)}$ de constante d'équilibre associée K=3, 2.

On dispose de fils d'argent et des trois solutions aqueuses suivantes : solution de sulfate de fer (II) ; solution de sulfate de fer (III) ; solution de nitrate d'argent.

À partir de cela, on réalise différents mélanges. On se demande si la composition de chacun va changer. Dites ce que vous prévoyez dans chaque cas et expliquez pourquoi.

Dans un premier bécher, les espèces chimiques en présence initialement sont telles que $n(Ag^{+})=5, 1.10^{-3}$ mol ; $n(Fe^{2+})=4, 8.10^{-3}$ mol ; $n(Ag)=1, 2.10^{-2}$ mol. Il n'y a pas d'ions Fe^{3+}.Le volume de la solution est égal à 100 mL.

R1 : $Q_{ri} = \dfrac{1}{[Ag^{+}] \times [Fe^{2+}]} = 408,5$ Qri>K.

La transformation se fait dans le sens inverse, l'argent va donc disparaître et la quantité d'ions Ag^{+} et Fe^{3+} va augmenter.

La deuxième *réponse R2* a été faite dans le cas d'une situation similaire à la précédente : la différence provient du fait que l'espèce absente ($Ag_{(s)}$) est solide.

Dans un troisième bécher, les espèces chimiques en présence initialement sont telles que $n(Ag^{+})=1, 0.10^{-2}$ mol ; $n(Fe^{2+})=1, 0.10^{-2}$ mol ; $n(Fe^{3+})=1, 0.10^{-2}$ mol. Il n'y a pas d'argent. Le volume de la solution est égal à 100 mL.

R2: $Q_{ri}=10$ $Q_{ri}>K$ évolution dans le sens inverse oxydation du fil d'argent.

Les quatre réponses suivantes portent toutes sur le même sujet, expliquer pourquoi une transformation chimique s'arrête. L'équation de réaction, la constante d'équilibre associée, la composition du mélange en quantité de matière dans l'état initial, dans l'état final sont données aux élèves. Les quatre espèces, des solutés (acide ou base), sont toutes présentes dans l'état initial et dans l'état final.

La question posée est « comment expliqueriez-vous que la transformation cesse ? », (réponses R3 et R6) ou « comment expliquez-vous que les concentrations gardent une valeur constante après un certain

temps ? », dans cette deuxième formulation la transformation a eu lieu dans le sens inverse de l'équation $AH_{(sq)} + B^-_{(sq)} = A^-_{(sq)} + BH_{(sq)}$ (réponses R4 et R5).

R3 : La transformation ne cesse pas, les mesures de pH donc les concentrations des différentes espèces chimiques gardent une valeur constante différente de leur valeur initiale car les deux réactions se font à la même vitesse. On est donc bien à l'état d'équilibre.

R4 : la transformation n'est pas totale mais en état d'équilibre. Dans cet état les transformations chimiques se produisent dans un sens et dans l'autre de l'équation écrite, à la même vitesse.

R5 : Après l'équilibre, la réaction se déroule dans les 2 sens. Au départ AH réagit avec B^- pour donner A^- et BH or à l'équilibre A^- réagit avec BH pour donner AH et B^-. La réaction n'évolue plus.

R6 : La transformation cesse à l'échelle macroscopique car, au bout d'un certain temps, le mélange se stabilise c'est-à-dire que les quantités des réactifs ainsi que des produits restent constantes. Cependant, à l'échelle microscopique, la réaction continue, mais avec la même vitesse dans le sens direct que dans le sens inverse et par conséquent les quantités de matière des espèces chimiques se stabilisent.