HAL open science

Modélisation : analyse de textes institutionnels dans le cas des transformations chimiques

Rémi Bouard, Sophie Canac, Isabelle Kermen

▶ **To cite this version:**

Rémi Bouard, Sophie Canac, Isabelle Kermen. Modélisation : analyse de textes institutionnels dans le cas des transformations chimiques. Lionel Pélissier; Patrice Venturini. Après les 12èmes rencontres scientifiques.. Actualité des recherches en didactique des sciences et des technologies, Éditions de l'ARDIST, pp.413-429, 2024, 978-2-9577091-1-3. hal-04420785

HAL Id: hal-04420785

https://hal.science/hal-04420785v1

Submitted on 26 Jan 2024

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

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

Modélisation : analyse de textes institutionnels dans le cas des transformations chimiques

Bouard Rémi [(1)], Canac Sophie [(2)], Kermen Isabelle [(3)]
[(1)] LDAR, Université Paris Cité– France
[(2)] LDAR, Univ Paris Est Créteil, Université Paris Cité, CY Cergy Paris Université, Univ. Lille, UNIROUEN – France
[(3)] CREAD, Univ Brest, Univ Rennes 2 – France

Résumé

Le programme de physique-chimie de la classe de seconde mis en place en France en 2019 met en avant la démarche de modélisation. Ce chapitre vise à présenter l'analyse de la modélisation des transformations chimiques par une réaction chimique proposée dans le programme et la ressource officielle associée. À partir de considérations épistémologiques et didactiques, nous élaborons une grille d'analyse composée d'indicateurs permettant de repérer des éléments de la démarche de modélisation proposée dans ces textes. Que ce soit dans le programme ou dans la ressource, le modèle réaction chimique est construit à partir d'une démarche inductive. Aucun des deux textes ne souligne le caractère explicatif du modèle, le caractère prédictif n'apparait que dans le programme. Le caractère unificateur du modèle, sa symbolique et son domaine de validité ne sont évoqués que dans la ressource.

Introduction

Nous présentons dans ce chapitre une analyse épistémologique et didactique de documents institutionnels relatifs à la démarche de modélisation, dans le cas des transformations

chimiques en classe de seconde (élèves de 15-16 ans) en France. Les deux documents concernés sont le programme de physique-chimie mis en place en 2019 et la ressource d'accompagnement dédiée à la partie du programme analysée. Dans le cadre d'une recherche sur les pratiques ordinaires d'enseignants du secondaire abordant en classe la modélisation des transformations chimiques par une réaction chimique, l'étude de ces textes institutionnels a constitué un préalable permettant de documenter le déterminant institutionnel des pratiques (Robert, 2008) afin d'évaluer son influence sur la conception et la mise en œuvre des séances. Pour réaliser cette étude préalable nous commençons par identifier, à partir d'une étude didactique, les différentes visions d'une démarche de modélisation en contexte scolaire. Dans un deuxième temps, nous caractérisons, à partir d'une analyse épistémologique, les aspects d'un modèle scientifique puis nous explicitons le modèle scolaire des transformations chimiques. De ces analyses préalables, nous concevons une grille d'indicateurs permettant, après validation de cette grille entre les trois chercheurs, l'analyse comparée des textes institutionnels.

Modélisation en contexte scolaire

Pour un épistémologue tel que Varenne (2016) cité par Crastes et Maurines (2021), la modélisation consiste à « choisir, concevoir ou produire un ou des modèles pour lesquels on a les moyens de les évaluer comme étant parmi les plus performants dans une ou plusieurs fonctions de connaissances attendues, dans un cadre donné ». Cette définition assez générale recouvre assez bien ce qui est considéré comme modélisation en contexte scolaire.

En France, les recherches étudiant ce que font les élèves en classe quand il est question de modélisation dans le domaine des sciences sont relativement anciennes. Les premières recherches menées en collaboration avec l'INRP (Institut National de la Recherche Pédagogique) par l'équipe du LIREST (Laboratoire Interuniversitaire de Recherche sur l'Enseignement des Sciences et des Techniques) avaient pour ambition « de se donner les moyens de transformer les contenus et les activités d'enseignement et d'apprentissage pour développer une maîtrise de la modélisation comme attitude et démarche intellectuelle utilisant certains outils » (Martinand, 1992, p. 8-9). Le modèle est alors le résultat du processus de modélisation (Larcher, 1996). Pour les propriétés de la matière (changements d'état physique, diffusion et compressibilité des gaz), deux exemples de modélisation alternant des phases d'enrichissement du modèle et d'interprétation d'une part (du registre expérimental vers le modèle) et des phases prédictives d'autre part (du modèle vers le

registre expérimental) ont été étudiés à cette époque (Chomat et al., 1988 ; Larcher et al., 1990). Ces processus ont été mis en œuvre par des élèves dans une étude concernant les modifications chimiques de la matière (Larcher et al., 1994), lors d'interprétations d'observations à l'aide du modèle initial proposé (constitué de particules insécables) et de prévisions de résultats expérimentaux à partir des représentations symboliques qu'ils avaient imaginées pour les particules. Les élèves ont dû radicalement modifier le modèle en prenant en compte des particules sécables, les seules à permettre l'interprétation des phénomènes observés. La modélisation, comme dans les études précédentes, s'est effectuée sur un temps long (plusieurs séances) et a conduit à l'élaboration d'un autre modèle pour un nouveau champ expérimental. Au cours de l'élaboration d'un modèle ou de son utilisation, Larcher (1994) souligne le rôle important des contrôles effectués pour estimer la cohérence interne du modèle ou son adéquation avec la situation expérimentale. Tiberghien et Vince (2005) ont montré qu'une difficulté majeure pour les élèves réside dans les relations à effectuer entre le registre expérimental et le monde des théories et des modèles, ces relations relevant aussi pour eux de la modélisation. Adúriz-Bravo (2013) nous paraît rassembler ces différentes visions de la modélisation (action de modéliser) en contexte scolaire, qu'il fait correspondre à l'un des quatre processus suivants :

- construire un nouveau modèle en respectant les connaissances déjà établies, que nous appelons processus de Construction ;
- utiliser un modèle pour expliquer des phénomènes, que nous appelons processus d'Application ;
- améliorer ou ajuster des modèles déjà établis à la lumière de nouvelles données, que nous appelons processus d'Amélioration ;
- apprendre à appliquer des modèles existants dans un contexte d'apprentissage, que nous appelons processus d'Apprentissage.

Le modèle scientifique

Dans ce paragraphe, nous présentons une réflexion épistémologique sur les modèles scientifiques. Reprenant la vision de Varenne (2013), nous préférons nous appuyer sur une revue des caractéristiques générales d'un modèle qui serviront de référence dans la suite plutôt que de donner une définition du modèle qui ne saurait être exhaustive.

Un modèle scientifique est une « construction intellectuelle de quelque chose (…) sciemment et délibérément infidèle à ce qu'il modélise » (Soler, 2013, p. 183). C'est cet écart avec la réalité qui permet au modèle de jouer le rôle d'un outil efficace pour résoudre des problèmes (*ibid.*). Il convient alors de bien identifier le phénomène modélisé (Justi et Gilbert, 2002) et de le distinguer du modèle (Morge et Doly, 2013) en repérant notamment les aspects du réel écartés. Nous réfèrerons à cela dans la suite en parlant du lien modèle – phénomène modélisé.

Plusieurs modèles peuvent rendre compte d'un même phénomène (Soler, 2013). Inversement, plusieurs phénomènes peuvent être interprétés par le même modèle. Ce dernier possède alors un caractère unificateur. Cet aspect correspond à ce que nous désignons par la suite comme la pluralité d'un modèle.

Un modèle peut être symbolisé, ce qui peut lui donner un aspect plus concret (Méheut et Chomat, 1990), mais un risque de confusion entre la représentation symbolique et le modèle lui-même existe (Justi et Gilbert, 2002).

Les fonctions d'un modèle sont de décrire la portion de réalité étudiée, prévoir son devenir et expliquer les phénomènes que l'on interroge (Johsua et Dupin, 1993 ; Oh et Oh, 2011 ; Robardet et Guillaud, 1997 ; Van Driel et Verloop, 2002). Il est considéré comme valide lorsque les prévisions qu'il permet de réaliser sont en adéquation avec les résultats obtenus expérimentalement (Morge et Dolly, 2013). Par la suite, ces aspects correspondent à ce que nous appelons l'efficacité d'un modèle.

Cette adéquation persiste tant que le modèle est appliqué dans son domaine de validité, qui est donc la portion de réalité dans laquelle le modèle est rendu efficace (Soler, 2013). Cet aspect correspond à ce que nous nommons ensuite la localité d'un modèle.

Pour résumer, cette analyse épistémologique conduit à distinguer quatre aspects d'un modèle scientifique : lien modèle – phénomène modélisé, pluralité, efficacité, localité.

Dans les programmes scolaires et dans les classes sont proposés des modèles scientifiques scolaires, ou modèles à enseigner. Ils proviennent de modèles scientifiques dont ils sont parfois très éloignés. En effet, utiliser des modèles scientifiques en classe nécessite que ceux-ci soient adaptés aux objectifs d'enseignement et aux capacités cognitives des élèves. Celles-ci sont très différentes par exemple pour un élève au début du collège et en fin de lycée. Les objectifs d'enseignement imposent également une progressivité dans la présentation des

modèles (et des éléments qui les constituent) dont la complexité peut évoluer avec le niveau d'étude.

L'exemple de la réaction chimique comme modèle en contexte scolaire

Le modèle scientifique scolaire des transformations chimiques évolue du cycle 4 où ne sont abordées que des transformations considérées comme totales jusqu'à la classe de terminale dans laquelle l'introduction de transformations non totales conduit au concept d'équilibre chimique et à un changement de modèle. Talanquer (2015) voit l'équilibre chimique comme un concept seuil dont la non-compréhension peut empêcher toute progression des apprenants en chimie. Le premier modèle proposé pour les transformations chimiques, en cycle 4, interprète celles-ci à un niveau microscopique comme « une redistribution des atomes » (MEN, 2020, p. 99). Cependant, une focalisation trop importante sur des interprétations microscopiques peut amener à éclipser la vision macroscopique de l'étude des substances en chimie (Talanquer, 2016), cette dernière se révélant pourtant plus significative pour les apprenants confrontés à une réalité macroscopique (Taber, 2020). À l'international, plusieurs auteurs (Sjöström et al., 2020; Taber, 2020) soulignent l'importance d'une approche thermodynamique (macroscopique par essence) pour traiter des transformations chimiques des substances. Le modèle macroscopique réaction chimique tel que proposé par Kermen (2018) peut être considéré comme une première approche thermodynamique des transformations chimiques ayant pour objectif l'introduction ultérieure du concept d'équilibre chimique dans le programme de Terminale. Dans ce cadre (Kermen, 2018), la transformation chimique fait partie du registre expérimental. Une description qui peut être qualifiée de phénoménologique concerne des changements de couleur, formation de solide, de bulles, modification de la température, qui sont des événements affectant les objets de la réalité perçue. Elle est moins spécifique que la description chimique dans la réalité idéalisée, où les compositions de l'état initial et de l'état final du système considéré sont précisées en termes d'espèces chimiques. La comparaison qualitative ou quantitative (selon les données à disposition) des compositions permet de caractériser la transformation comme chimique. Ce bilan constitue la première étape de l'approche thermodynamique.

La réaction chimique est un modèle macroscopique d'une famille de transformations chimiques :

- totales, c'est-à-dire que l'une au moins des espèces introduites dans l'état initial du système est complètement consommée dans l'état final ;
- de systèmes similaires, c'est-à-dire que ce sont les mêmes espèces qui sont introduites dans l'état initial, mais dans des quantités pouvant varier.

Ce modèle permet d'unifier les régularités observées : ce sont toujours les mêmes espèces chimiques dont les quantités de matière diminuent entre l'état initial et l'état final du système, alors appelées réactifs, et ce dans des proportions invariantes. De même ce sont toujours les mêmes espèces chimiques appelées produits dont les quantités de matière augmentent de l'état initial à l'état final, dans des proportions invariantes. Ce modèle indique indirectement, c'est-à-dire en les omettant, quelles espèces chimiques n'interagissent pas alors qu'elles sont présentes dans le système. Cette différence entre le modèle et les transformations chimiques qui sont des bilans de toutes les espèces chimiques présentes dans chaque système étudié, illustre l'écart entre le modèle et la portion de réalité qu'il décrit.

Le domaine de validité du modèle, à savoir son champ d'application, correspond à l'ensemble des systèmes similaires dont l'évolution donne lieu à une famille de transformations chimiques totales interprétées ou prévues par le modèle réaction. Celui-ci permet d'expliquer ou de prévoir l'état final d'un système à partir de la donnée d'un état initial. Cette réaction est symbolisée par une équation de réaction qui comporte sous une forme synthétique toutes les informations relatives aux réactifs, produits et aux proportions dans lesquelles leurs quantités de matières évoluent.

Problématique

Le programme français de physique-chimie mis en place en classe de seconde en 2019 souligne la « place essentielle » de l'activité de modélisation (MEN, 2019, p. 4), notamment développée dans la partie relative à l'étude des transformations chimiques. Une ressource (Éduscol, 2019) complémentaire à cette partie du programme propose une démarche qui « s'appuie sur une situation développée dans le cadre de travaux didactiques par Isabelle Kermen ». Cette démarche s'apparente à ce que Sjöström et al. (2020) nomment un modèle « didaktik » de séquence ayant pour objectif de guider les choix et les réflexions des enseignants lors de la préparation et la mise en œuvre de la séquence.

Compte tenu des difficultés déjà mises en lumière (Kermen et Méheut, 2008) rencontrées par les enseignants concernant la distinction entre registre expérimental (transformation

chimique) et registre des modèles (réaction chimique), une étude des textes institutionnels (programme et ressource Éduscol) vise à déterminer en quoi ils pourraient constituer une source de réflexion et un guide pour l'action en classe lors de la modélisation des transformations chimiques, entendue au sens d'Adúriz-Bravo (2013). Nous pensons que la présence explicite dans les textes institutionnels des quatre aspects permettant de caractériser un modèle scientifique, identifiés au cours de l'analyse épistémologique, constituerait une aide essentielle pour guider les enseignants. Notre question de recherche est donc la suivante : quelle élaboration de la modélisation des transformations chimiques par les élèves les textes officiels préconisent-ils ?

Méthodologie

Nous détaillons dans cette partie l'élaboration en deux étapes de notre outil d'analyse des textes institutionnels prenant la forme d'une grille de lecture. Celle-ci est composée d'indicateurs à rechercher dans le programme et la ressource et qui permettent de repérer la prise en compte d'une caractéristique du modèle réaction chimique dans ces textes.

Caractéristiques spécifiques d'un modèle scientifique : cas de la réaction chimique

Dans cette première étape, nous repartons de l'analyse épistémologique que nous avons conduite pour aboutir aux caractéristiques générales d'un modèle scientifique. De l'analyse épistémologique, nous extrayons sept caractéristiques générales présentées dans la colonne gauche du tableau 1, nommées C1 à C7 et réparties dans les quatre aspects d'un modèle présentés précédemment (lien modèle – phénomène modélisé, pluralité, efficacité, localité).

Puis nous recherchons ce qui dans l'analyse didactique du modèle réaction chimique (Kermen, 2018) correspond à chaque caractéristique générale. Par un processus d'identification des caractéristiques C1 à C7 pour la réaction chimique, nous déduisons pour le modèle réaction chimique des caractéristiques spécifiques, colonne de droite du tableau 1.

Caractéristiques générales d'un modèle		Transposition à la réaction chimique (caractéristiques spécifiques)
Lien modèle – phénomène modélisé		
C1	Il est le modèle d'un phénomène.	La réaction chimique modélise la / les transformation(s) chimique(s), ces deux concepts sont distincts.
C2	Il laisse certains aspects du réel du côté.	Des aspects sont explicitement non pris en compte (variation de certains paramètres physiques, descriptions phénoménologiques, …).
Pluralité		
C3	Il possède un caractère unificateur.	La réaction chimique modélise les transformations chimiques de systèmes dont les états initiaux et finaux diffèrent mais dont le devenir de certaines espèces chimiques toujours présentes à l'état initial est similaire.
Efficacité		
C4	Il peut être symbolisé.	L'équation de réaction symbolise la réaction chimique. Elle contient de nombreuses informations.
C5	Il a un caractère explicatif.	La réaction chimique permet d'expliquer des observations qualitatives à partir de la nature des espèces mises en jeu ou quantitatives à partir de la stœchiométrie.
C6	Il a un caractère prédictif.	La réaction chimique permet de prévoir des observations qualitatives, à partir de la nature des espèces mises en jeu, ou quantitatives, à partir de la stœchiométrie.
Localité		
C7	Il a un domaine de validité.	Une réaction chimique ne modélise que des transformations chimiques où l'un des réactifs au moins disparaît (transformations totales) et pour des systèmes de composition qualitative similaire.

Tableau n°1 : Caractéristiques générales d'un modèle regroupées selon les quatre aspects d'un modèle - Application au modèle réaction chimique

Nous estimons par exemple que la caractéristique C7 exprimant l'existence d'un domaine de validité pour tout modèle se traduit pour le modèle réaction chimique par sa limitation à un ensemble de transformations chimiques totales pour des systèmes similaires, à savoir ayant une composition chimique qualitativement semblable.

Élaboration de la grille d'indicateurs

Dans cette deuxième étape, nous croisons les caractéristiques spécifiques du modèle réaction chimique obtenues précédemment aux acceptions de la notion de modélisation en contexte scolaire selon Adúriz-Bravo (2013) (Construction, Application, Amélioration et Apprentissage). Pour ce faire, nous élaborons, pour chacune de ces acceptions, une liste d'indicateurs *a priori* centrés sur la recherche d'actions possibles, de la part d'un enseignant,

abordant en classe une caractéristique spécifique (tableau 1) du modèle réaction chimique. Ces indicateurs proviennent d'un croisement entre la connaissance de l'analyse didactique du modèle (Kermen, 2018) et nos expériences d'observation de classe en formation ou en recherche (Kermen et Colin, 2017). L'acception Amélioration a été exclue de ce processus : le modèle réaction chimique n'est pas issu de l'amélioration d'un modèle macroscopique préexistant, ce qui serait le cas pour la modélisation des transformations chimiques non totales en classe de première et terminale (MEN, 2019b). Nous considérons pour cette étude que le processus d'Application se déroule en autonomie de la part des élèves alors que le processus d'Apprentissage se déroule conjointement avec l'enseignant. La liste des indicateurs, leur formulation et leur répartition dans les différents critères sont finalisés après accord entre les trois chercheurs. La grille complète comporte 44 indicateurs :

- 13 indicateurs pour la Construction du bilan transformation chimique (i1 à i13) ;
- 19 indicateurs pour la Construction du modèle réaction chimique (i14 à i32) ;
- 6 indicateurs pour l'Apprentissage du modèle réaction chimique (i33 à i38) ;
- 6 indicateurs pour l'Application du modèle réaction chimique (i34 à i44).

Nous ajoutons à la Construction du modèle réaction chimique celle du bilan transformation chimique qui nécessite de passer d'un fait courant (la réalité perçue) à un fait scientifique (la réalité idéalisée), objet de sciences qui nécessite un arsenal théorique pour pouvoir être traité (espèce chimique, quantité de matière, …) (Jullien, 2020).

Nous présentons un extrait de la grille complétée dans le tableau 2.

Caractéristiques	n°	Indicateurs	Programme ou Ressource
Construction du modèle « réaction chimique »			
C1 Il est le modèle d'un phénomène	i14	Annoncer la construction d'un modèle	P et R
	i15	Faire des allers et retours entre modèle en construction et bilans expérimentaux	
	i16	Utiliser le terme « réaction » comme le modèle de la transformation chimique	P et R
	i17	Faire établir la liste des réactifs	P et R
	i18	Faire établir la liste des produits	P et R
	i19	Faire établir la liste des espèces spectatrices	R
	i20	S'appuyer sur des principes théoriques pour étayer ou écarter des propositions	
	i21	Faire établir un lien (approximatif) entre des quantités de matière pertinentes dans une transformation chimique	R
	i22	Faire utiliser la conservation des éléments chimiques pour ajuster l'équation de réaction	P et R
C2 Il laisse les aspects du réel de côté	i23	Faire écarter des paramètres physiques	
C3 Il possède un caractère unificateur	i24	Faire réaliser plusieurs transformations chimiques similaires	R
	i25	Faire remarquer que les réactifs et les produits sont les mêmes pour destransformations chimiques similaires	R
	i26	Faire remarquer que les relations entre variations de quantités de matière pertinentes sont les mêmes pour des transformations chimiques similaires	R
	i27	Rechercher la relation de proportionnalité entre les variations de quantités de matière	R
C4 Il peut être symbolisé	i28	Dire que l'équation s'écrit avec les formules chimiques (des espèces)	R
	i29	Expliciter la signification des symboles + et →	
	i30	Faire le lien entre les proportions déterminées précédemment et les nombres stœchiométriques	R
C7 Il a un domaine de validité	i31	Ne pas utiliser de langage microscopique pour l'équation	R
	i32	Indiquer que seules les transformations chimiques totales sont concernées	

Tableau n°2 : Extrait de la liste des indicateurs et des caractéristiques associées limité à l'acception « Construction de la modélisation » présents dans le Programme (P) ou dans la Ressource (R)

Traitement des données à l'aide de la grille d'indicateurs

Une lecture précise des textes officiels – programme (MEN 2019a, pp. 4-8) et ressource Éduscol (2019) – ainsi que l'interprétation des intentions et prescriptions qui y figurent amènent au remplissage de la grille des indicateurs (colonne de droite du tableau 2).

Dans l'acception Construction du modèle, nous proposons par exemple pour C1 des indicateurs relatifs à l'établissement de la liste des réactifs, produits et espèces spectatrices (indicateurs i17, i18 et i19 du tableau 2). Dans le programme (MEN, 2019a), les phrases du bloc d'introduction précisant la démarche nécessaire pour obtenir les « espèces chimiques présentes dans l'état initial et qui ont réagi » et « celles présentes dans l'état final et qui ont été formées » (texte souligné dans la figure 1) nous permettent de valider les indicateurs i17 et i18 pour le programme, validation indiquée par la lettre « P ».

2. Modélisation des transformations de la matière et transfert d'énergie

L'objectif de cette partie est d'identifier et de distinguer les trois types de transformation de la matière, de les modéliser par des réactions et d'écrire les équations ajustées en utilisant les lois de conservation appropriées. Une première approche des énergies mises en jeu lors de ces trois types de transformations permet de montrer que l'énergie transférée lors d'une transformation dépend des quantités de matière des espèces mises en jeu.

L'étude des transformations chimiques, entamée au collège, est complétée par les notions de stœchiométrie, d'espèce spectatrice et de réactif limitant. L'analyse de l'évolution d'un système pour modéliser sa transformation chimique par une réaction illustre une démarche de modélisation au niveau macroscopique. Elle nécessite de mettre en place une démarche expérimentale rigoureuse pour passer :

- d'une description des modifications visibles ;
- aux espèces chimiques, présentes dans l'état initial et qui ont réagi ;
- à celles, présentes dans l'état final et qui ont été formées ;
- et enfin, à l'écriture d'une réaction rendant compte au mieux des changements observés au niveau macroscopique.

Pour que les transformations soient plus concrètes, des exemples provenant de la vie quotidienne sont proposés : combustions, corrosions, détartrage, synthèses d'arôme ou de parfum, etc.

Notions abordées au collège (cycle 4)

Transformations physiques : changement d'état, conservation de la masse, variation du volume, température de changement d'état.

Transformations chimiques : conservation de la masse, redistribution d'atomes, notion d'équation chimique, réactions entre espèces acides et basiques en solution, réactions d'une espèce acide sur un métal, mesure de pH.

Figure n°8 : Extrait du programme de Physique-Chimie de seconde (MEN, 2019a, p. 7)

En revanche, bien que les termes « espèce spectatrice » soient présents dans le bloc d'introduction de cette partie du programme (texte souligné dans la figure 1), ils ne sont pas

mentionnés dans la dite démarche et ne sont pas associés à une recommandation à destination des enseignants, ce qui nous amène à ne pas valider l'indicateur i19. Dans la ressource, une étape de la démarche proposée nommée « sélectionner les espèces chimiques qui ont réagi (réactifs) ou ont été formées (produits) » invite à « séparer les espèces chimiques en trois catégories », les « espèces réactives », les « espèces produites » et les « espèces spectatrices ». Nous validons alors, pour la ressource, les indicateurs i17, i18 et i19 par la lettre « R » dans la colonne de droite du tableau 2.

Après avoir réalisé ce travail pour l'ensemble des indicateurs, l'analyse de ceux présents ou non dans la grille de résultats nous permet de caractériser l'élaboration de la modélisation des transformations chimiques proposée par les textes officiels.

Résultats

Nous présentons dans le tableau 3 le résultat de la présence des caractéristiques générales du modèle (C1 à C7) dans le programme ou la ressource. La présence de la caractéristique est confirmée dès lors qu'au moins un indicateur associé à cette caractéristique a été validé pour le texte indiqué. Seules deux caractéristiques, C1 et C6, sont présentes dans le programme. La ressource en comporte quatre : C1, C3, C4 et C7. Les caractéristiques C2, correspondant aux aspects du réel laissés de côté, et C5, correspondant au caractère explicatif d'un modèle, n'ont été repérées dans aucun des deux textes.

Caractéristiques générales d'un modèle		Programme	Ressource
C1	Il est le modèle d'un certain phénomène	X	X
C2	Il laisse certains aspects du réel du côté.		
C3	Il possède un caractère unificateur		X
C4	Il peut être symbolisé.		X
C5	Il a un caractère explicatif.		
C6	Il a un caractère prédictif.	X	
C7	Il a un domaine de validité.		X

Tableau n°3 – Présence des caractéristiques générales d'un modèle dans les textes officiels

Nous indiquons dans le tableau 4 le nombre d'indicateurs repérés dans chaque texte pour chacune des acceptions considérées. Sur les 44 indicateurs possibles, 13 ont été repérés dans le programme et 26 dans la ressource. La majorité des indicateurs repérés pour le programme

et pour la ressource l'ont été pour l'acception Construction (du bilan transformation ou du modèle réaction).

	Nombre d'indicateurs dans la grille dont…	**… repérés dans le programme**	**… repérés dans la ressource**
Construction du bilan transformation chimique	13	7	10
Construction du modèle réaction chimique	19	5	14
Apprentissage du modèle réaction chimique	6	0	2
Application du modèle réaction chimique	6	1	0
Total	44	13	26

Tableau n°4 – Décompte des indicateurs selon les visions de la modélisation en contexte scolaire repérés pour chaque acception, dans le programme et dans la ressource

La liste des indicateurs pour la Construction du bilan transformation chimique montre qu'aucun texte ne fait de référence explicite au système chimique. De plus, tout ce qui correspond à l'exploitation de résultats expérimentaux n'est présent que dans la ressource.

L'extrait de la grille présenté dans le tableau 2 et concernant les indicateurs relatifs à l'acception Construction du modèle réaction chimique ainsi que le tableau 4 montrent que sur les 19 indicateurs possibles de cette acception, 5 ont été repérés pour le programme et 14 pour la ressource. Certains indicateurs sont absents des deux textes (i15, i20, i23, i29, i32) et plusieurs indicateurs ne sont présents que dans la ressource : ce sont les indicateurs associés aux caractéristiques C3 (caractère unificateur), C4 (le modèle peut être symbolisé) et C7 (domaine de validité).

Enfin, les indicateurs en lien avec des allers-retours possibles modèle-expérience n'apparaissent pas, ni la possibilité de prendre un appui théorique pour la modélisation. En effet, que ce soit dans le programme ou dans la ressource, le modèle réaction chimique est issu de l'observation expérimentale conduisant à la transformation chimique. Cela peut s'expliquer par la présence de la capacité exigible « Modéliser, à partir des données expérimentales, une transformation par une réaction » (MEN, 2019a, p. 8) dans le programme. L'extrait du programme figure 1 précise d'ailleurs les étapes de la démarche à

suivre. Celle-ci part de la description des observables puis des espèces présentes dans le système à l'état initial et à l'état final pour induire (absence de i20) finalement la réaction. Cette démarche linéaire (absence de i15) est illustrée dans la ressource à partir de deux exemples. Est également proposée dans la ressource la détermination des nombres stœchiométriques à partir des mesures expérimentales des quantités de matière des espèces présentes dans l'état final. Mais que ce soit dans le programme ou dans la ressource, les textes officiels n'indiquent pas comment faire pour identifier les espèces spectatrices. On peut alors s'interroger sur la possibilité d'identifier toutes les espèces chimiques présentes dans l'état final et sur la valeur des nombres stœchiométriques sans prendre appui sur un modèle permettant d'expliquer les premiers faits observables.

Discussion et conclusion

Notre analyse révèle 26 indicateurs dans la ressource, soit deux fois plus que dans le programme, mais les fonctions explicatives et prédictives du modèle ne sont pas mentionnées dans la ressource, ni le champ d'application du modèle qui est limité aux transformations totales. Pourtant, explorer les limites du modèle ou son champ d'application de façon explicite est nécessaire pour aider les élèves à voir dans le modèle un outil de réflexion (Taber, 2015) comme les études conduites par Chomat et al. (1998) et Larcher et al (1994) l'ont montré.

La démarche proposée lors de la phase de construction (transformation chimique et modèle) nous semble discutable. Elle fournit une vision purement inductive de la construction du modèle, contestable dans la mesure où l'élaboration de ce dernier repose aussi sur des considérations théoriques (Justi et Gilbert, 2002) avec des allers-retours entre modèle et registre expérimental (Chomat et al., 1988 ; Larcher et al., 1994), au moins pour la détermination des espèces spectatrices et des nombres stœchiométriques. Lors d'une situation analogue à ce que suggère le programme de seconde, à savoir l'écriture d'une équation de réaction à partir d'observations expérimentales en classe de terminale, une enseignante observée ne peut conduire une démarche purement inductive : elle s'appuie sur le principe théorique de conservation des éléments chimiques pour justifier la formation d'une espèce ionique (Kermen, 2021). On peut regretter qu'un exemple de ce type d'usage d'un élément théorique n'ait pas été rappelé dans la ressource, où le niveau de détails possibles est beaucoup plus fin que dans le programme. Cette démarche constituée d'allers-retours est caractéristique de la modélisation en sciences expérimentales. Coquidé déclare

que la seule observation de la dissection d'un petit mammifère ne permet pas de comprendre l'organisation de l'appareil digestif, cette compréhension ne s'effectue qu'à l'issue d'allers-retours entre le domaine intellectuel et le domaine empirique, ce que ne mentionnent pas la plupart des manuels scolaires (Coquidé, 2015, p. 37). Pour Blanquet et Picholle (2015, p. 48), cette « navigation » entre le modèle et le système étudié pour valider le modèle construit ou tester la validité des prévisions constitue une compétence méthodologique fondamentale de la modélisation.

Dans la mesure où les textes institutionnels ne donnent pas d'exemple d'évaluation de la notion de modèle ou de ses fonctions explicatives et prédictives, et en prenant appui sur le fait qu'il y a en général alignement des contenus d'enseignement sur les contenus des épreuves institutionnelles (Rozenwajn et Dumay, 2014), nous faisons l'hypothèse que cela n'incite pas les enseignants à faire explicitement travailler les élèves avec des modèles et à les faire réfléchir sur leurs fonctions. Nous allons donc prolonger cette étude par l'observation de pratiques ordinaires d'enseignants au moment de l'introduction du modèle réaction chimique

Bibiographie

Adúriz-Bravo, A. (2013). A 'Semantic' View of Scientific Models for Science Education. *Science & Education*, *22*(7), 1593-1611. https://doi.org/10.1007/s11191-011-9431-7

Blanquet, E. et Picholle, É. (2015). Premiers contacts avec la modélisation scientifique à l'école. Dans T. Evrard et B. Amory (dir.), *Les modèles : des incontournables pour enseigner les sciences : apprendre les sciences de 2 ans 1/2 à 18 ans* (p. 45-64). De Boeck.

Chomat, A., Larcher, C., et Méheut, M. (1988). Modèle particulaire et activités de modélisation en classe de quatrième. *Aster*, *7*, 143-184. https://doi.org/10.4267/2042/9222

Coquidé, M. (2015). Modèles et modélisation dans l'enseignement scientifique. Dans T. Evrard et B. Amory (dir.), *Les modèles : des incontournables pour enseigner les sciences: apprendre les sciences de 2 ans 1/2 à 18 ans* (p. 35-44). De Boeck.

Crastes, C. et Maurines, L. (2021). Enseigner l'écoulement interne d'un fluide en France et aux États-Unis : modèles et contextes au travers des pratiques déclarées d'enseignants du supérieur. *RDST. Recherches en didactique des sciences et des technologies*, 24, 59-85. https://doi.org/10.4000/rdst.3913

Éduscol. (2019). *Modéliser, au niveau macroscopique, une transformation chimique par une réaction chimique*. https://cache.media.eduscol.education.fr/file/Physique-chimie/32/0/RA19_Lycee_GT_2-1_PHYCHI_Modeliser-macroscopique-transformation-chimique_1161320.pdf

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

Jullien, V. (2020). *Ce que peuvent les sciences*. Éditions Matériologiques.

Justi, R. S. et Gilbert, J. K. (2002). Modelling, teachers' views on the nature of modelling, and implications for the education of modellers. *International Journal of Science Education, 24*(4), 369-387. https://doi.org/10.1080/09500690110110142

Kermen, I. (2018). *Enseigner l'évolution des systèmes chimiques au lycée : Savoirs et modèles, raisonnements d'élèves, pratiques enseignantes*. Presses Universitaires de Rennes.

Kermen, I. (2021). Cadre d'analyse du savoir en chimie : mise à l'épreuve sur l'analyse de séances de classe. Dans J.-M. Boilevin et A. Jameau (dir.) *Après les 10e rencontres scientifiques… Actualité des recherches en didactique des sciences et des technologies* (p. 267-283). https://ardist.org/wp-content/uploads/2021/04/ARDIST_2018.pdf

Kermen, I. et Colin, P. (2017). Trois mises en œuvre d'une transformation chimique pour introduire le thème des piles : Des choix didactiques très contrastés. *Éducation et didactique, 11*(11-2), 187-212. https://doi.org/10.4000/educationdidactique.2772

Kermen, I. et Méheut, M. (2008). Mise en place d'un nouveau programme à propos de l'évolution des systèmes chimiques : Impact sur les connaissances professionnelles d'enseignants. *Didaskalia, 32* (77-116). https://doi.org/10.4267/2042/23981

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

Larcher, C. (1996). La physique et la chimie, sciences de modèles. Dans J. Toussaint (dir.), *Didactique appliquée de la physique-chimie* (p. 160-178). Nathan.

Larcher, C., Chomat, A. et Lineatte, C. (1994). D'une représentation à une autre pour modéliser les transformations de la matière au collège. *Aster, 18,* 119-139. https://doi.org/10.4267/2042/8602

Larcher, C., Chomat, A. et Méheut, M. (1990). A la recherche d'une stratégie pédagogique pour modéliser la matière dans ses différents états. *Revue française de pédagogie, 93*(1), 51-61. https://doi.org/10.3406/rfp.1990.1373

Martinand, J.-L. (1992). Présentation. Dans Équipe INRP / LIREST (dir.), *Enseignement et apprentissage de la modélisation en sciences* (p. 7-22). INRP.

Méheut, M. et 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*, 417-437.

Ministère de l'Éducation Nationale. (2019a). Programme de l'enseignement de physique-chimie de la classe de seconde générale et technologique. *BOEN Spécial n°1 du 22 janvier 2019*.

Ministère de l'Éducation Nationale. (2019b). Programme de physique-chimie de terminale générale. *BOEN Spécial n°8 du 25 juillet 2019*.

Ministère de l'Éducation Nationale. (2020). Programme du cycle 4 en vigueur à la rentrée 2020. *BOEN n°31 du 30 juillet 2020.*

Morge, L. et Doly, A.-M. (2013). L'enseignement de notion de modèle : Quels modèles pour faire comprendre la distinction entre modèle et réalité ? *Spirale. Revue de recherches en éducation, 52*(1), 149-175. https://doi.org/10.3406/spira.2013.1066

Oh, P. S. et Oh, S. J. (2011). What Teachers of Science Need to Know about Models: An overview. *International Journal of Science Education, 33*(8), 1109-1130. https ://doi.org/10.1080/09500693.2010.502191

Robardet, G. et Guillaud, J.-C. (1997). *Eléments de didactique des sciences physiques*. Presses Universitaires de France.

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

Rozenwajn, E. et Dumay, X. (2014). Les effets de l'évaluation externe sur les pratiques enseignantes : Une revue de la littérature. *Revue française de pédagogie, 189*, 105-138. https://doi.org/10.4000/rfp.4636

Sjöström, J., Eilks, I. et Talanquer, V. (2020). Didaktik models in chemistry education. *Journal of chemical education, 97*(4), 910-915. https://doi.org/10.1021/acs.jchemed.9b01034

Soler, L. (2013). Qu'est-ce qu'un modèle scientifique? Des caractéristiques du modèle qui importent du point de vue de l'enseignement intégré de science et de technologie. *Spirale - Revue de recherches en éducation, 52*(1), 177-214. https://doi.org/10.3406/spira.2013.1067

Taber, K. S. (2015). The role of conceptual integration in understanding and learning chemistry. Dans *J. García-Martínez and E. Serrano-Torregrosa (Eds.), Chemistry Education : Best Practices, Opportunities and Trends (p.* 375-394). (Wiley-VCH Verlag GmbH&Co.

Taber, K. S. (2020). Conceptual confusion in the chemistry curriculum: Exemplifying the problematic nature of representing chemical concepts as target knowledge. *Foundations of Chemistry, 22*(2), 309-334. https://doi.org/10.1007/s10698-019-09346-3

Talanquer, V. (2015). Threshold concepts in chemistry: The critical role of implicit schemas. *Journal of Chemical Education, 92*(1), 3-9. https://doi.org/10.1021/ed500679k

Talanquer, V. (2016). Central ideas in chemistry: An alternative perspective. *Journal of Chemical Education, 93*(1), 3-8. https://doi.org/ 10.1021/acs.jchemed.5b00434

Tiberghien, A. et Vince, J. (2005). Études de l'activité des élèves de lycée en situation d'enseignement de la physique. Cahiers du Français Contemporain, (10), 153-176.

Van Driel J. H. et Verloop N., (2002), Experienced teachers' knowledge of teaching and learning of models and modelling in science education, International Journal of. Science Education, 24, 1255-1272. https://doi.org/10.1080/09500690210126711

Varenne, F. (2013). Modèles et simulations dans l'enquête scientifique : Variétés traditionnelles et mutations contemporaines. In Franck Varenne, Marc Silberstein (dir.), Modéliser & simuler. Epistémologies et pratiques de la modélisation et de la simulation, (Tome 1, p. 11-49). Éditions Matériologiques.