

## **Le savoir à enseigner relatif à la transformation chimique en première année de lycée en Tunisie et sa perception par les enseignants**

**Imène Mzoughi-Khadhraoui<sup>1</sup>, Alain Dumon<sup>2</sup> et Malika Ayadi-Trabelsi<sup>3</sup>**

<sup>1</sup>Institut supérieur de l'éducation et de la formation continue, Le bardo, Tunisie. E-mail : [mzoughiimen@yahoo.fr](mailto:mzoughiimen@yahoo.fr). <sup>2</sup>Institut Universitaire de Formation des Maîtres d'Aquitaine et Laboratoire Cultures, Education, Sociétés, Université Bordeaux 2, France. E-mail: [alain.dumon@aquitaine.iufm.fr](mailto:alain.dumon@aquitaine.iufm.fr). <sup>3</sup>Faculté des sciences de Bizerte, Tunisie.

**Résumé:** Dans le but d'étudier le rapport institutionnel des élèves au savoir lors de leur premier apprentissage de la transformation chimique, nous avons dans un premier temps cherché à identifier, dans les instructions officielles et l'ouvrage officiel d'enseignement, quels sont les savoirs à enseigner, comment ils sont organisés et quels rapports ont-ils avec une analyse de la modélisation de la transformation chimique que nous avons réalisée? Nous nous sommes ensuite intéressés aux connaissances pédagogiques des enseignants relatives au contenu à enseigner (ou PCK). Le questionnement de 17 enseignants de l'enseignement secondaire tunisien a montré: une relation étroite entre les conceptions des enseignants sur la réaction chimique et la méthode à adopter pour l'enseigner avec le savoir à enseigner figurant dans le manuel; un déficit de connaissances disciplinaires et certaines confusions; un manque de perception des difficultés d'apprentissage pouvant être rencontrées par les élèves. Il s'ensuit quelques propositions pour l'enseignement et la formation des enseignants.

**Mots clés:** Transformation chimique, modélisation, rapport institutionnel au savoir, savoir à enseigner, enseignants.

**Title:** Knowledge to be taught relating to the chemical change into first year of upper secondary school in Tunisia and its perception by the teachers.

**Summary:** With an aim of studying the institutional relation of the students to the knowledge at the time of their first learning of the chemical change, in the first time, we have tried to identify, in the official instructions and the official teaching book, which are the knowledge to be taught, how they are organized and which relations do they have with an analysis of the chemical change modeling which we have realized? We were then interested in Pedagogical Contents Knowledge of the teachers relating to the teaching of chemical change. The questioning of 17 teachers of Tunisian secondary education showed: a close connection between the conceptions of the teachers on the chemical reaction and the method to adopt to teach it with the knowledge to be taught appearing in the textbook; a deficit of contents knowledge and certain confusions; a lack of perception of the difficulties of

teaching which can be encountered by the students. Its result some proposition for teaching and teacher training.

**Keywords:** Chemical change, modeling, institutional relation with the knowledge, knowledge to be taught, teachers

### **Introduction**

Lors du premier rapport avec le concept de transformation chimique, au niveau de la première année du lycée en Tunisie, l'objectif principal est d'amener les élèves à représenter et interpréter des transformations chimiques pouvant se produire entre différentes espèces. Il faut pour cela dépasser la simple description des phénomènes pour modéliser la transformation chimique. Comme l'écrit Cassirer (1910, p. 243), il y a nécessité en chimie de "condenser une foule de relations obtenues par voie d'expérience dans une expression unique, en faisant l'hypothèse d'un support unique ayant statut de chose" (substance chimique, réactifs et produits, réaction chimique, élément chimique, acide ou base, valence des éléments, etc.).

#### *La modélisation de la transformation chimique*

Modéliser, c'est passer d'une description première des objets et événements perceptibles du champ expérimental de référence (Robardet et Guillaud, 1994; Tiberghien, 1994) ou référent empirique (Martinand, 1995), ce que Martinand dénomme phénoménographie, à une description seconde faisant appel au monde des théories et modèles (concepts, modèles, lois, formalisme, etc.), ce que Martinand dénomme phénoménologie. Considérons l'expérience de la combustion du charbon prise comme exemple dans l'enseignement de première année. La description première de cette transformation, utilisant le langage quotidien, serait: le charbon brûle dans l'air, on observe une légère flamme, le charbon devient rouge et il y a un dégagement de chaleur. La première étape de la modélisation de la transformation consiste à amener les élèves à décrire le fait expérimental en utilisant le langage de la chimie: le carbone brûle en présence du dioxygène (de l'air), il se forme un gaz qui trouble l'eau de chaux, le dioxyde de carbone. On néglige pour l'instant un certain nombre de phénomènes perceptifs (flamme, chaleur, couleur, amorçage de la réaction, vitesse), qui pourront intervenir pour servir de référent empirique à l'introduction des caractères de la transformation (amorcé ou instantané; rapide ou lent; exothermique ou endothermique) pour se centrer sur le changement de nature des substances chimiques. Dans les étapes suivantes, de ce que Martinand nomme "élaboration modélisante", cette description seconde deviendra phénoménographie et la nouvelle phénoménologie sera formulée sous la forme, le carbone réagit avec le dioxygène pour donner du dioxyde de carbone (le test à l'eau de chaux n'est plus mentionné), qui sera ensuite traduite sous forme d'une relation littérale entre réactifs et produit, carbone + dioxygène → dioxyde de carbone (dit schéma de réaction en Tunisie), puis d'une relation entre les formules représentatives des espèces chimiques:  $C + O_2 \rightarrow CO_2$  (l'équation de réaction). Equation qui traduit la conservation de la matière au cours de la transformation.

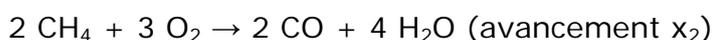
Une des spécificités de la chimie est donc que l'activité de modélisation ne se contente pas de donner une description possible de l'interaction entre les objets du monde perceptible, elle change les objets et travaille sur de nouveaux objets dans une approche théorique (Le Maréchal, 1999). Dans ce processus le langage chimique, avec ses symboles, occupe une place essentielle pour communiquer les informations permettant de rendre compte des phénomènes observés. Selon Jacob (2001) et Psarros (1996) le langage chimique comporte plusieurs niveaux. Un premier niveau de langage pour nommer les entités chimiques, la nomenclature, c'est-à-dire l'ensemble méthodique d'organisation des noms (Mestrallet, 1980 ; Khanfour-Armalé et Le Maréchal, 2009). Un niveau relatif au vocabulaire qui permet au chimiste de parler des substances en général (corps purs, corps simples ou composés, ions, précipité, acide, alcool, etc.). Un niveau contenant les termes du langage de la théorie chimique: lois (loi des proportions définies ou multiples, loi de conservation de la matière, électroneutralité, etc.), modèles et théories (atome, molécule, liaison covalente, vitesse et chaleur de réaction, etc.). Enfin, un niveau symbolique qui comprend les symboles chimiques des substances et qui possède ses propres règles pour l'usage opérationnel des symboles. Le langage symbolique possède un alphabet (les symboles des éléments), une syntaxe particulière (règles prenant en compte la valence, l'état d'oxydation, l'électronégativité, les mécanismes de réaction, etc.) et une série de règles sémantiques (la conservation des éléments, des charges, la simple flèche ou le signe =, etc.). Les symboles des éléments peuvent se combiner pour former des "mots" (les formules chimiques, qui représentent aussi bien les substances chimiques que la composition d'une entité moléculaire ou ionique.) en accord avec certaines règles orthographiques, et les mots peuvent être combinés pour former des phrases (les équations de réaction) en respectant certaines règles grammaticales. Dans les formules, les indices indiquent le nombre d'éléments de chaque espèce constitutive de l'entité ; dans l'écriture symbolique d'une réaction, le signe + signifie que les réactifs mis en présence réagissent dans les proportions indiquées par les coefficients stœchiométriques pour donner (évolution symbolisée ici par la flèche) des produits qui seront dans les proportions indiqués par leurs coefficients stœchiométriques et lors de cette évolution les éléments se conservent. Le langage de la chimie s'apparente ainsi à une véritable linguistique (Laszlo, 1993 ; Barlet, 1999).

Une autre caractéristique de la chimie est que les observables accessibles à l'expérience sont le résultat de réactions et d'interactions entre des nombres gigantesques d'entités moléculaires, atomiques ou ioniques. Par conséquent, en chimie, peu d'observations macroscopiques peuvent être interprétées sans le recours à une représentation à l'échelle microscopique sous forme de modèles. Le modèle en chimie fonctionne le plus souvent sur un type d'explication que Halbwachs (1973, p.77) nomme "bathygène", c'est à dire une "explication par le niveau plus profond et par les structures sous-jacentes". La dialectique macroscopique-microscopique est une autre composante épistémologique de la chimie (Barlet, 1999). Reprenons la combustion du charbon en utilisant les deux mondes de la chimie introduits par Le Maréchal (1999). La modélisation de cette transformation au niveau macroscopique a été présentée par la mise en relation des objets et événements du monde perceptible (charbon, air, combustion, trouble de

l'eau de chaux) avec des objets et événements du monde reconstruit (carbone, dioxygène, dioxyde de carbone, le carbone et le dioxygène réagissent pour former du dioxyde de carbone) puis représentée en utilisant un langage symbolique (schéma de réaction, équation de réaction qui traduit la conservation de la matière). Mais pour expliquer aux élèves la nomenclature des espèces chimiques mises en jeu, il a fallu introduire les notions d'atome et de molécule et dire que les dénominations résultaient de la composition atomique des molécules (ce qui n'est pas toujours aussi simple que dans cet exemple!). De même l'explication de la valeur des coefficients (ou nombres stœchiométriques), dans le cas par exemple de l'équation de réaction symbolisant la combustion du méthane -  $\text{CH}_4 + 2\text{O}_2 \rightarrow \text{CO}_2 + 2\text{H}_2\text{O}$ , implique d'introduire ce que traduit cette équation à l'échelle microscopique: la conservation des "atomes" (plus exactement des éléments).

En résumé, une transformation chimique correspond au passage d'un système chimique (l'ensemble des espèces chimiques présentes lors de la transformation chimique) de son état initial à son état final. Une transformation chimique se produit chaque fois qu'une ou plusieurs espèces chimiques présente(s) dans l'état initial (les réactifs) se transforme(nt) pour donner une ou plusieurs espèce(s) nouvelle(s) à l'état final (les produits). Les espèces chimiques sont soit des corps purs, soit des ions en solutions. Elles ont un nom et peuvent être identifiées par des tests de caractérisation. La transformation chimique est caractérisée par un principe: la conservation de la matière. Elle se produit quelle que soit la quantité des réactifs mis en présence et s'arrête, soit lorsque le réactif limitant a totalement disparu (c'est le cas en première année du lycée), soit lorsqu'elle n'est pas complète, lorsqu'un état d'équilibre est atteint. La transformation des espèces initiales en de nouvelles espèces (les autres variables caractérisant l'état du système étant oubliées) peut être modélisée par une réaction chimique (Davous et al., 1999) et représentée, soit de façon qualitative par un schéma de réaction traduisant le changement de nature des espèces chimiques, soit par une équation de réaction traduisant de façon quantitative la conservation de la matière en indiquant les proportions dans lesquelles les réactifs réagissent et se forment les produits. Au cours du processus les atomes (ou éléments) se réorganisent au sein des entités moléculaires ou ioniques et se conservent en nature et en nombre.

Mais toutes les transformations chimiques ne peuvent être modélisées par une seule réaction et représentées par une seule équation de réaction. Par exemple lors de la combustion du méthane, si l'oxygène est en défaut (réactif limitant), la combustion incomplète conduit à la formation de monoxyde de carbone et de carbone. La transformation ne peut alors être décrite par une seule réaction et symbolisée par une équation du type:  $4\text{CH}_4(\text{g}) + 6\text{O}_2(\text{g}) \rightarrow \text{CO}_2(\text{g}) + 2\text{CO} + \text{C}(\text{s}) + 8\text{H}_2\text{O}(\text{l})$ . En effet, la formation de dioxyde de carbone et de carbone en même quantité et de deux fois plus de monoxyde de carbone n'est pas observée. Pour modéliser la transformation on est obligé d'avoir recours à plusieurs réactions chimiques, ayant chacune leur propre avancement, représentées par les équations:





Il en est de même pour la formation de la rouille qui ne peut être modélisée par une seule réaction chimique (d'où l'intérêt de différencier transformation et réaction chimique).

### *Les élèves et la transformation chimique*

Pour comprendre et modéliser la transformation chimique, l'élève doit donc être en mesure de circuler entre le monde perceptible du champ expérimental de référence et le monde reconstruit, aux deux niveaux macroscopiques et microscopiques d'interprétation de l'acte chimique (l'opérateur assurant le lien entre ces deux niveaux étant la mole), en utilisant un langage spécifique (ou le registre symbolique occupe une place importante) reposant sur des règles et/ou des conventions. La nécessité de circuler entre ces différents niveaux de signification (Johnstone, 2000; Larcher, 1994) semble représenter pour beaucoup d'élèves une demande insurmontable (De Jong et Van Driel, 2004). Les compétences à mettre en œuvre pour s'approprier ce modèle, intégrateur de nombreux objets de savoir, et l'utiliser de façon opérationnelles sont en effet diverses. Il serait donc illusoire de croire qu'alors que les scientifiques ont mis des siècles à le construire, les élèves seraient capables de se l'approprier et de l'utiliser facilement.

Les nombreuses recherches menées sur l'enseignement apprentissage de la transformation chimique (Nous avons analysé 140 articles parus entre 1978 et 2007) confirment ce point de vue. Elles ont mis en évidence l'existence de difficultés à tous les niveaux d'interprétation:

- Au niveau macroscopique: difficultés à concevoir ce qu'est une substance chimique, difficulté à différencier une transformation chimique d'une transformation physique, difficulté à conceptualiser une transformation chimique en termes de changement de nature des substances chimiques, difficulté à percevoir la conservation de la masse au cours d'une transformation chimique;

- Au niveau microscopique: difficultés à utiliser les concepts du niveau particulaire (atome, molécule, ion) pour se représenter la matière et ses transformations, difficultés à percevoir la conservation des atomes et leur réarrangement au cours d'une transformation;

- Au niveau de la représentation symbolique : difficultés à comprendre ce que représentent les formules des espèces chimiques, difficulté à écrire, lire une équation de réaction et à comprendre ce qu'elle représente tant au niveau macroscopique qu'au niveau microscopique;

- Au niveau du traitement quantitatif de la transformation chimique: difficultés avec la signification des coefficients stœchiométriques, difficultés avec la notion de réactif limitant et son identification, difficultés avec le concept de quantité de matière/mole et ses grandeurs associées (masse molaire, volume molaire), difficultés dans le traitement mathématique et le choix de stratégies de résolution appropriées.

### *Position du problème*

Comme le font remarquer Hesse et Anderson (1992) "l'apprentissage de la transformation chimique requière des modifications complexes dans l'écologie conceptuelle de beaucoup d'élèves". On peut ajouter à cela que la majorité des concepts chimiques ne peuvent être appris de manière logique, "du moins pas en terme de conséquence claire déduite d'une idée initiale acceptée et/ou d'interprétation d'une évidence empirique" (Taber, 2001). En effet, en chimie il n'existe pas de réaction prototypique dans laquelle le modèle affleure presque l'expérience. Donc, lors du premier contact des élèves avec la modélisation de la transformation chimique, un guidage réfléchi s'impose pour amener l'élève à se construire une représentation la plus scientifique possible des objets du modèle. Si à l'évidence cette première rencontre avec le savoir enseigné ne détermine pas entièrement le rapport à l'objet d'étude, lequel se construit et se remanie tout au long du processus de l'apprentissage, elle joue cependant un rôle important dans l'économie de l'apprentissage, parce que, étant donné l'investissement institutionnel et personnel quelle impose, elle oriente en général fortement le développement ultérieur des rapports institutionnel et personnel à l'objet rencontré (Chevallard, 1999). Pour Chevallard (1989), l'émergence du rapport personnel d'un individu X à un savoir S suppose l'établissement de relations institutionnelles entre cet individu et des institutions. Par exemple, au sein de l'institution enseignement de la chimie où S est présent, se produit un découpage institutionnel de S qui aboutit à la définition, à un moment donné, d'un système d'objets de savoir, articulé en un texte du savoir S attaché à l'institution (par exemple, le savoir à enseigner relatif à la transformation chimique). Dans l'institution enseignement on distingue deux places, celle de l'enseignant et celle de l'élève, correspondant chacune à des rapports institutionnels et personnels au savoir différent. S'intéresser au rapport institutionnel des élèves au savoir, c'est éclaircir le rôle joué par l'enseignant lors du passage du savoir à enseigner proposé dans les programmes et les instructions officielles et adaptés dans les manuels (le texte du savoir à enseigner), au savoir réellement enseigné. L'enseignant va interpréter le texte du savoir dont il dispose pour construire les séquences d'enseignement qui seront proposées aux élèves. De l'interaction entre l'enseignant et les élèves lors du déroulement de ces séquences va en découler le curriculum réellement enseigné. C'est en fonction de son rapport personnel au savoir que l'enseignant va mettre en scène et animé les séquences d'enseignement. Pour compléter l'approche de Chevallard, nous considérerons les connaissances nécessaires pour pouvoir transformer un contenu à enseigner en quelque chose qui puisse être compris par les élèves (Geddis & Wood, 1997 ; Bucat, 2004). Elles ont été, suite aux travaux de Shulman (1986), regroupées par les auteurs anglo-saxons sous la dénomination de "Pedagogical Content Knowledge" (voir par exemple: Van Driel et al. 1998; De Jong et Van Driel, 2004); expression qui a été traduite en français par "connaissance pédagogique relative au contenu" (Méheut, 2006). Cette dénomination de PCK se réfère à la connaissance de l'enseignement et de l'apprentissage d'une discipline particulière, elle prend donc en compte les exigences particulières d'apprentissage inhérentes à l'objet de savoir (Shulman, 1986; Geddis & Wood, 1997; Bucat, 2004). En accord avec certains auteurs (Dumas Carré et Goffard, 1998; Rollnick et al., 2008) nous considérerons que ces exigences regroupent:

- des connaissances disciplinaires: elles comportent, outre les nécessaires savoirs disciplinaires, les connaissances historiques et épistémologiques (en particulier le rôle joué par la modélisation et les modèles dans la construction des connaissances) sur les différents objets de savoir à enseigner ;

- des connaissances curriculaires: l'enseignant doit non seulement connaître les programmes, tant du point de vue des concepts à enseigner que des compétences exigibles, mais également les choix axiologiques des concepteurs relatifs aux finalités de l'enseignement de la discipline et à ses modalités d'approche;

- des connaissances didactiques: elles concernent des aspects liés à la résolution de problèmes, aux difficultés d'apprentissage, à la prise en compte des conceptions, à la gestion des erreurs, à la place et au rôle de l'évaluation, à l'utilisation des TICE;

- des connaissances pédagogiques: elles sont relatives à l'organisation de la leçon, au choix des activités à mettre en place pour faciliter la compréhension des concepts par les élèves, à l'organisation et à la gestion des interactions dans la classe pour permettre aux élèves de raisonner et de donner du sens aux notions introduites, etc.

#### *Questions de recherche et méthodologie*

Les enseignants tunisiens ont eu pour seule formation initiale les quatre années de leur formation universitaire accompagnée de quelques stages dans la classe d'un enseignant confirmé. Ils n'ont de plus jamais bénéficié de formation continue consacrée à l'enseignement de la transformation chimique. Il en résulte que le plus souvent leurs situations d'enseignement/apprentissages sont simplement construites en conformité avec l'organisation des contenus du manuel scolaire (il n'existe qu'un manuel, officiel, en Tunisie).

Nous allons chercher dans un premier temps à identifier, dans les instructions officielles et l'ouvrage officiel d'enseignement, quels sont les savoirs à enseigner et comment ils sont organisés? Quels rapports entretiennent-ils avec les considérations précédentes relatives à la modélisation de la transformation chimique? Quelles sont les indications susceptibles d'orienter l'enseignant pour l'organisation des activités d'apprentissages?

Nous nous intéresserons ensuite au rapport personnel des enseignants au savoir à enseigner. Autrement dit, quelles sont les connaissances constitutives de leur PCK susceptibles d'être mises en œuvre pour assurer le passage du savoir à enseigner au savoir enseigné? Pour répondre à cette question, nous avons interrogé par questionnaire (les questions posées et leurs objectifs seront indiqués au fur et à mesure) 17 enseignants de sciences physiques de l'enseignement secondaire tunisien de différentes régions, qui enseignent au niveau de la première année et dont l'ancienneté varie de 2 à 25 ans. Nous sommes conscients que ce questionnaire est centré sur les connaissances déclaratives des enseignants sur l'action et que la mise en œuvre du savoir dans la classe repose également sur des connaissances dans l'action. Celles-ci seront analysées pour 3 enseignants

dans une prochaine étude. Nous tenterons de répondre aux questions suivantes : l'enseignant est-il lui-même conscient de la complexité de la chimie, de ses différents niveaux d'interprétation et de la spécificité de son langage ? Quel rôle attribue-t-il à la modélisation et quelle compréhension a-t-il du modèle ? A-t-il conscience du double aspect du symbolisme de l'équation chimique afin de pouvoir l'expliquer à ces élèves ? Comment perçoit-il les difficultés rencontrées par les élèves ? Dans une étude ultérieure, nous nous intéresserons au savoir réellement enseigné en classe.

### **Analyse du savoir à enseigner**

Au cours de la 9<sup>ème</sup> année de l'école de base, les élèves tunisiens ont déjà eu une première approche, en langue Arabe, de la constitution de la matière (atomes, molécules, leur symbolisation et leur représentation par des modèles moléculaires), de la réaction chimique définie comme « une transformation au cours de laquelle des corps disparaissent et des corps nouveaux apparaissent » puis représentée sous forme littérale par un schéma de réaction avant d'être symbolisée par une équation chimique. Lors de la première année de l'enseignement secondaire, cette fois francisant, il s'agira d'amener les élèves à intégrer, approfondir et conceptualiser les notions déjà vues dans le but de modéliser des transformations chimiques et d'en effectuer un traitement quantitatif.

En première année de l'enseignement du lycée, les connaissances introduites en début d'année scolaire et susceptibles d'être mobilisées par les élèves pour interpréter les informations reçues lors de l'apprentissage de la transformation chimique sont les suivantes: La différence entre corps purs et mélanges (homogènes et hétérogènes); les objets du modèle à l'échelle atomique et moléculaire (molécules, atomes, ions); la différence entre corps simple et corps composés ; la nomenclature de quelques corps simples ou composés et d'ions; l'utilisation des symboles pour écrire la formule d'un corps pur ou d'un ion; la mole (définie comme la quantité de matière d'un ensemble contenant N particules identiques. c'est aussi l'unité de la quantité de matière), le nombre d'Avogadro (N), la masse molaire, le volume molaire.

L'enseignement de la réaction chimique est abordé environ deux mois plus tard, il est découpé en trois chapitres. Un chapitre consacré à la notion de réaction chimique, dont la finalité est d'arriver à la définition de la réaction chimique à partir de l'interprétation d'expériences réalisées en classe; un chapitre consacré à l'étude qualitative d'une réaction chimique, destiné à faire ressortir les conditions expérimentales nécessaires à la réalisation de certaines expériences et à introduire les caractères qualitatifs d'une réaction chimique et enfin, un chapitre consacré à l'étude quantitative d'une réaction chimique. Il doit conduire les élèves à savoir écrire l'équation d'une réaction en utilisant la loi de conservation de la matière et à réaliser le traitement quantitatif de réactions chimiques où les réactifs sont mis en quantités connues et quelconques. C'est donc une séquence où la relation entre le champ empirique de référence et le monde des théories et modèles doit apparaître de façon conséquente. L'accent est mis dans les instructions officielles sur la loi de conservation et le double aspect du symbolisme de l'équation d'une réaction chimique.

Nous avons essayé de dégager des instructions officielles la démarche proposée pour amener les élèves à passer de l'observation des faits d'expériences à leur représentation sous forme d'une équation de réaction. Elle consiste à passer de la description en langage quotidien de la transformation observée à une description utilisant une phénoménologie scientifique de plus en plus élaborée: (1) passage de la description des objets et événements du référent empirique (solide, liquide, gaz, effervescence, flamme, etc.) aux objets et événements reconstruits (substances chimiques représentées par leurs noms, ions en solution, changement de nature des substances chimiques, réaction rapide ou lente, endothermique ou exothermique, etc. ; (2) modélisation de l'évènement reconstruit, changement de nature des substances chimiques, sous forme d'une réaction chimique puis (3) représentation de cette évolution par un schéma de réaction (réactifs → produits); (4) écriture symbolique des réactifs et des produits, et de la réaction par une équation qui traduit la conservation de la masse au niveau macroscopique et celle des atomes au niveau microscopique. Cette équation permet une représentation symbolique des changements observés (5) et une interprétation quantitative de ces changements en effectuant un retour sur le registre empirique (6) (figure 1).

Démarche, en conformité avec la démarche de modélisation décrite au paragraphe précédent, qui peut être représenté par le schéma de la figure 2. Les passages directs (5) et (6) ne sont réalisables par les élèves que s'ils ont déjà été entraînés à les faire en passant respectivement par (1), (2) et (3), puis (4). Ceci nécessite, lors de l'enseignement, de tenir compte des difficultés qu'ils sont susceptibles de rencontrer à tous les niveaux d'interprétation de l'acte chimique et dans leur mise en relation. Lors de cette première approche de la transformation chimique il convient donc de ne pas considérer ces différents passages comme des évidences.

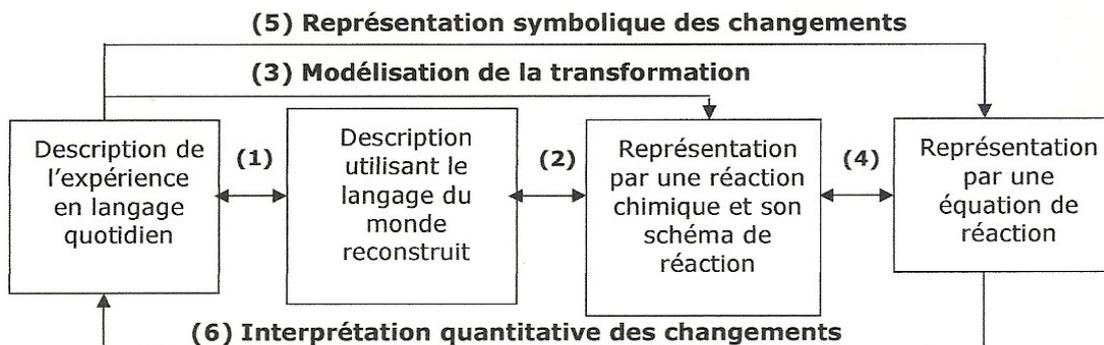


Figure 1.- Les descriptions possibles du référent empirique.

De l'analyse détaillée des savoirs à enseigner, tels qu'ils apparaissent dans le programme et qu'ils sont traduits dans le manuel d'enseignement (Mzoughi, 2010) il ressort:

- Une absence de traitement opératoire du concept d'espèce chimique. La réaction chimique est définie en termes de disparition et d'apparition de corps et non en termes de changement de nature des espèces chimiques: une réaction chimique est une transformation au cours de laquelle des corps disparaissent et des corps nouveaux apparaissent. Les corps qui

disparaissent sont les réactifs et les corps qui apparaissent sont les produits de la réaction. Mais, sous quelles formes se trouvent ces corps? Est-ce que cette dénomination convient aussi bien à un corps pur solide ou gazeux (ou substance chimique), pouvant être simple ou composé, qu'à une solution contenant des ions? Dans ce cas est-ce la nature des ions, qui sont les entités chimiques qui réagissent, par exemple pour former un précipité, qui change au cours de la transformation ou est-ce une ou deux solutions (qui ne sont pas des corps chimique) qui donnent une nouvelle solution (contenant d'autres ions) ou se transforment en un précipité? Les concepts de corps pur (simple ou composé), de solution, d'ions en solution, vus en début d'année, mériteraient d'être explicitement réinvestit à ce niveau pour répondre à ces questions. Cela permettrait la mise en relation de la conservation et de la transformation dans les changements, avant tout travail de modélisation au niveau atomique et moléculaire. De plus, une telle définition ne peut que renforcer la conception de la transformation chimique présente chez les élèves que Krnel et al. (1998) dénomment le modèle des objets qui disparaissent et apparaissent. On peut également regretter l'absence, en fin du troisième chapitre, d'une définition plus opératoire de la transformation/réaction chimique reprenant les différentes notions introduites, par exemple : une transformation chimique se produit chaque fois qu'une ou plusieurs espèces chimiques présente(s) dans l'état initial (les réactifs) se transforme(nt) pour donner une ou plusieurs espèce(s) nouvelle(s) à l'état final (les produits). Les espèces chimiques sont soit des corps purs, soit des ions en solutions. Au cours du processus les atomes se réorganisent au sein des entités moléculaires ou ioniques et se conservent en nature et en nombre. La transformation chimique est caractérisée par un principe : la conservation de la matière (masse, atome). Elle se produit quelle que soit la quantité des réactifs mis en présence et s'arrête lorsque le réactif limitant a totalement disparu.

- Une absence de mise en relation claire du langage quotidien et du langage du monde reconstruit. Par exemple dans l'introduction de la réaction entre l'acide chlorhydrique (produit actif contenu dans un détartrant) et le tartre (le calcaire) il est écrit: "L'acide chlorhydrique réagit avec le calcaire pour donner des corps nouveaux : le dioxyde de carbone et une solution". Cette description fait appel à la fois au langage quotidien (calcaire et solution) et au langage du monde reconstruit (acide chlorhydrique et dioxyde de carbone). En quoi le passage de la solution initiale (celle incolore d'acide chlorhydrique) à la solution finale (solution toujours incolore dont la composition n'est pas précisée) traduit-il un changement de nature des corps? Seul l'évènement perceptible effervescence due à l'apparition d'un gaz (mais au fait d'où peut venir le dioxyde de carbone formé?) permet d'en inférer que l'on a à faire à une transformation chimique. Il en est de même pour l'interprétation de la formation de fumées blanches (monde perceptible) lorsqu'on approche deux baguettes de verre trempées dans des solutions concentrées d'acide chlorhydrique et d'ammoniac (monde reconstruit).

- Une acquisition des règles d'écriture (les noms des produits formés découlent de ceux des réactifs) et de lecture (un ou plusieurs réactifs → un ou plusieurs produits) des schémas de réaction qui repose uniquement sur l'écriture de plusieurs schémas de réaction. Il est en particulier laissé à la

charge des élèves la lourde tâche de généraliser un tel schéma sous la forme réactif(s) → produit(s)! De plus, comme la nomenclature exacte des espèces chimiques qui réagissent n'est pas toujours précisée, des difficultés sont à prévoir. Reprenons l'exemple de la formation des fumées blanches. Est-il si évident que cela pour les élèves de leur donner le nom de chlorure d'ammonium (solide) alors que le nom et la nature des espèces chimiques qui réagissent (le chlorure d'hydrogène gazeux - et non la solution d'acide chlorhydrique - et l'ammoniac gazeux) ne sont pas clairement indiqués? Il conviendrait donc, pour aider les élèves, d'utiliser la nomenclature adéquate pour nommer les réactifs: parler de carbonate de calcium au lieu de calcaire, de solution d'hydroxyde de sodium à la place de soude de façon à leur permettre de comprendre le nom donné aux produits formés: (solution) de chlorure de calcium, (précipité) d'hydroxyde de cuivre II, (solution de) sulfate de sodium, etc.

- Une explicitation insuffisante de ce que représente un schéma de réaction. Comme toutes les informations concernant les événements perçus (changement d'aspect, précipitation, effervescence, explosion, flamme, vitesse, etc.) ne sont pas prises en compte on représente donc uniquement le changement de nature des espèces chimiques et l'évolution du système par un tel schéma. Autrement dit, on modélise la transformation par une réaction chimique; réaction qui est ensuite symbolisée par un schéma de réaction. Ce n'est donc pas la réaction qui est amorcée ou spontanée, rapide ou lente, exothermique ou endothermique, c'est le passage de l'état initial à l'état final du système chimique (comme cela apparaît explicitement lors de la présentation des réactions lentes), c'est-à-dire la transformation observée. Ne peut-on apporter cette précision aux élèves? Est-ce que cette distinction entre transformation et réaction chimique ne serait pas utile pour comprendre qu'une transformation chimique ne nécessite pas que les réactifs soient mis en présence dans les proportions stœchiométriques découlant de l'écriture de l'équation de réaction?

- Un passage de l'écriture du schéma de réaction à l'équation de réaction semble qui repose sur quelques évidences:

La première est que les élèves seraient capables sans difficulté d'associer une formule représentative à une espèce chimique. Cette association à certes était réalisée dans un chapitre précédent mais sont-ils réellement en mesure de le faire? Ne conviendrait-il pas d'y revenir à ce moment de l'enseignement.

La deuxième concerne la double signification de l'écriture des formules chimiques et donc de l'équation de réaction. Elle est présentée sans qu'il soit fait explicitement référence ni à la notion de modèle, ni à la réorganisation des atomes (qui se conservent en nature et en nombre) lors de la transformation des réactifs en produits. Seules deux représentations à l'échelle atomique ou moléculaire sont censées introduire ces deux aspects que les élèves devront généraliser pour comprendre la double signification de l'équation de réaction. Lourde tâche pour des débutants qui ont des difficultés à mettre en relation le registre empirique avec le monde des théories et modèles.

- Quelques confusions dans la mise en relation du référent empirique avec le monde des théories et modèles. Par exemple, écrire "qu'un atome

de soufre réagit avec une molécule de dioxygène pour donner une molécule de dioxyde de soufre" traduit une confusion entre le registre empirique (la réaction modélise la transformation à l'échelle macroscopique) et le registre des modèles à l'échelle microscopique (des molécules se transforment en d'autres molécules). Il en est de même pour la lecture de l'équation de réaction  $\text{CH}_4 + 2 \text{O}_2 \rightarrow \text{CO}_2 + 2 \text{H}_2\text{O}$ , à l'échelle macroscopique, sous la forme: 1 mole de molécules de méthane réagit avec 2 moles de molécules de dioxygène pour donner une mole de molécules de dioxyde de carbone et 2 moles de molécules d'eau. Ici, c'est la différence entre la réaction chimique modélisant la transformation expérimentale observée, phénomène macroscopique qui peut se produire quelles que soient les quantités de matière mises en présence et qui s'arrêtera (à ce niveau d'enseignement) lorsque le réactif limitant aura totalement réagi, et sa représentation symbolique qui n'est pas réalisé. Ces confusions peuvent entraîner certaines conceptions alternatives chez les élèves.

- Une absence de formulation explicite des procédures à mettre en œuvre pour effectuer le bilan quantitatif d'une transformation chimique. Compte tenu des nombreuses études mettant en évidence la difficulté rencontrée par les élèves quand à la signification des coefficients stœchiométriques, à leur utilisation pour déterminer le rapport des quantités de matière selon lequel les réactifs réagissent et les produits sont formés et à la prise en compte du réactif limitant (par exemple, Schmidt, 1994; Kousathana et Tsaparlis, 2002; Boujaoude et Barakat, 2003; Laugier et Dumon, 2003; Sanger, 2005; Agung et Schwartz, 2007; Fach et al., 2007; Gauchon et Méheut, 2007) il est nécessaire de les guider fortement dans la procédure de résolution. Or ici aussi des évidences apparaissent. Par exemple, lorsque les coefficients stœchiométriques ne sont pas égaux, il semble que les élèves devraient être capables de déduire la relation entre les quantités de matière de la simple lecture de l'équation de réaction: comme  $\text{CH}_4 + 2 \text{O}_2 \rightarrow \text{CO}_2 + 2 \text{H}_2\text{O}$ , deux moles d'oxygène réagissent avec une mole de  $\text{CH}_4$ , et donc la quantité de matière de  $\text{O}_2$  qui a réagi est le double de celle de  $\text{CH}_4$ . Cette simple déduction logique, que les élèves devront généraliser, paraît difficile à mettre en œuvre. De plus, la présentation des procédures à utiliser pour identifier le réactif limitant (par exemple: si le rapport  $n_X/n_Y$  est supérieur au rapport coef. X/coef. Y, le réactif X est en excès et le réactif Y est le réactif limitant ; c'est l'inverse si  $n_X/n_Y < \text{coef. X/coef. Y}$ ), et donc de déterminer les quantités de matière des produits formés et du réactif en excès restant (Pour trouver la quantité de matière de X qui réagit connaissant celle de Y (réactif limitant) on écrit  $n_X/n_Y = \text{coef. X/coef. Y} = a$ , alors  $n_X = a.n_Y$ ), n'est précisée que sur un exemple dans un exercice corrigé.

### **Le rapport personnel des enseignants au savoir à enseigner**

A l'aide du questionnaire soumis aux enseignants, nous avons cherché à analyser qu'elles étaient leurs:

- connaissances disciplinaires, c'est-à-dire les conceptions que les enseignants ont de la transformation chimique et de sa symbolisation par l'équation de réaction;

- connaissances pédagogiques, en particulier leurs choix méthodologiques pour aborder l'enseignement des objets de savoir relatif au savoir à enseigner;

- connaissances didactiques, les difficultés d'apprentissage que sont susceptible de rencontrer les élèves et la manière de les prendre en compte.

Les réponses aux différentes questions seront analysées de façon à en inférer les différentes catégories de connaissances de leur PCK définies ci-dessus. Pour chaque question sera indiqué l'objectif spécifique visé par la question.

#### *Les connaissances disciplinaires*

Q1: Quelle différence faites-vous entre transformation chimique, réaction chimique et équation chimique?

L'objectif est de savoir si les professeurs font une différence entre transformation et réaction chimique, puis entre la réaction chimique qui représente l'évolution de la composition d'un système chimique, le schéma de réaction qui symbolise cette évolution en termes de réactifs et de produits et l'équation chimique qui symbolise la conservation dans le changement au cours de cette évolution et qui peut être lue aux niveaux macroscopique et microscopique. La connaissance de ces différences devrait permettre aux enseignants d'assurer une circulation claire et explicite entre les différents niveaux de description d'une transformation chimique lors de l'enseignement dispensé aux élèves. Cependant, en conformité avec le texte du savoir à enseigner, la différence transformation/réaction chimique ne devrait pas apparaître.

Les enseignants ont effectivement des difficultés pour parler de la transformation chimique. Ils sont nombreux à ne pas faire de commentaire ou à avouer ne pas avoir d'idée à son sujet. Conformément au texte du savoir à enseigner pour deux enseignants (+ 1, voir la suite), c'est la même chose que la réaction. Le terme transformation est soit uniquement réservé à une transformation physique, soit une transformation peut-être physique (changement d'état) ou chimique (réaction). Enfin deux enseignants assimilent la transformation à un changement et un seul précise que c'est un changement de nature des substances.

En ce qui concerne la réaction chimique, elle est définie, conformément à la définition donnée dans l'ouvrage d'enseignement, en termes de transformation au cours de laquelle il y a disparition et apparition, de corps (3 enseignants), de réactifs et de produits (2 enseignants) ou d'entités (1 enseignant): transformation chimique et réaction chimique sont bien des concepts équivalents pour ces enseignants. Bien que ces définitions ne puissent être critiquées, elles traduisent cependant un manque de recul par rapport au savoir à enseigner: il n'y a pas disparition et apparition mais conservation dans le changement. Pour trois autres enseignants, la réaction chimique correspond à un changement des réactifs en produit, ce qui est plus conforme à ce qu'elle représente effectivement.

Certaines confusions apparaissent entre les différents termes. Un enseignant indique que la réaction chimique est sensiblement équivalente à l'équation chimique, en précisant que la réaction est "équilibrée" alors que

l'équation ne l'est pas. Pour un autre, "une réaction chimique correspond à un réarrangement des atomes". Il y a donc confusion entre la réaction qui modélise la transformation au niveau macroscopique et sa symbolisation, l'équation de réaction, qui doit être équilibrée (et non la réaction) et qui peut effectivement être lue au niveau microscopique. Enfin pour un autre la réaction correspond à ce qui est observé expérimentalement, c'est-à-dire la transformation chimique. Ces différentes confusions sont susceptibles d'entraîner certaines conceptions alternatives chez leurs élèves.

En ce qui concerne l'équation chimique, 6 enseignants n'ont pas indiqué ce quelle représente pour eux. Pour 8 enseignants c'est une représentation, une écriture, une symbolisation de la réaction chimique, "qui nous renseigne sur les produits mélangés et les produits obtenus" (3 enseignants) ou permet une "étude quantitative de la réaction" (1 enseignant), sans d'autres précisions à ce niveau sur ce qu'elle traduit effectivement (voir réponses à la question 3). Pour d'autres, (3 enseignants) elle est assimilée au schéma de la réaction ou une simple symbolisation des réactifs et des produits.

On peut en conclure que la différence entre la réaction chimique modélisant la transformation expérimentale observée à l'échelle macroscopique et sa représentation symbolique n'est pas clairement perçue par tous les enseignants. De plus, l'absence de précision sur ce que traduit l'équation de réaction nous amène à supposer que pour certains, l'équation chimique n'est qu'une commodité d'écriture pour représenter une réaction (à confirmer).

Q2: Pensez-vous que la définition préconisée par le manuel et le programme officiel permet d'expliquer aux élèves ce qu'est une transformation chimique?

La définition donnée par le manuel et par le programme officiel tunisien de première année ne permet pas de parler de la transformation, au niveau macroscopique en termes de changement de nature des espèces chimiques (corps purs, simples ou composés, ions en solution) mis en jeu accompagnée d'une conservation de la matière (les termes de disparition et d'apparition ne favorisent en effet pas cette interprétation) et, au niveau microscopique, en termes de conservation et de réorganisation des atomes. Si l'enseignant répond par l'affirmative on peut en inférer qu'il ne conçoit pas l'utilité de tous ces aspects d'une autre définition.

En conformité avec les réponses précédentes, la grande majorité des enseignants (13/17) estime que la définition préconisée par le manuel scolaire permet d'expliquer aux élèves ce qu'est une transformation chimique, avec seulement trois commentaires, en termes de réactifs et de produits ou de disparition et d'apparition des corps. Des quatre enseignants indiquant qu'elle n'est pas satisfaisante un seul donne une justification en précisant que "la disparition totale ou limitée des réactifs est fonction des conditions expérimentales".

C'est une définition qui peut en effet être considérée comme suffisante (mis à part les termes d'apparition et de disparition) pour décrire les évolutions observées au niveau macroscopique, le passage d'un état initial à un état final (dont on peut regretter que ce ne soit pas explicitement

préciser). Mais elle a le défaut de ne pas faire référence à la conservation de la matière aussi bien au niveau macroscopique que microscopique.

Q3: Que représente pour vous l'équation chimique?

L'objectif est de savoir si l'enseignant est conscient du fait que l'équation chimique est une symbolisation d'un modèle qui représente une réalité complexe souvent difficile à appréhender (la réaction chimique) et que c'est un moyen de traduire cette réalité sous forme de principes de conservation dans les niveaux macroscopique et microscopique en indiquant les proportions stœchiométriques dans lesquelles les réactifs se transforment pour donner les produits. Dans les réponses des 17 enseignants peuvent figurer plusieurs représentations liées à l'équation chimique.

Les réponses à cette question, montrent que pour 7 enseignants, l'équation chimique est tout d'abord une représentation (symbolique: 3 enseignants) de (qui traduit: 2 enseignants) la réaction chimique. Pour trois enseignants elle a une double signification ou donne des indications dans les niveaux microscopiques et macroscopique mais sans que la notion de conservation n'apparaisse. Les indications sont relatives à la nature des réactifs et des produits ou à une étude quantitative, et pour un enseignant elle permet au niveau microscopique d'expliquer le mécanisme réactionnel, ce qui n'est absolument pas le rôle d'une équation de réaction qui représente un bilan indépendant des mécanismes mis en jeux.

Pour 6 autres, ce bilan concerne la conservation des atomes (2 enseignants), la conservation de la masse (1 enseignant) ou simplement un bilan quantitatif (quantités de matière ou atomes) et qualitatif (nature des réactifs et des produits) (3 enseignants). Notons que le bilan qualitatif relatif à la nature des réactifs et des produits est traduit par le schéma de réaction, ce qui peut laisser supposer que ces enseignants ne font pas la distinction entre le schéma (qualitatif) de la réaction et l'équation (quantitatif) de réaction, confusion faite explicitement par un enseignant. Enfin lorsqu'un enseignant (8 ans d'ancienneté) écrit que "l'équation de réaction traduit la conservation de la quantité de matière" on peut penser qu'il fait la confusion entre quantité de matière et masse. Comment pourra-t-il conduire ses élèves à comprendre que la mole est l'unité de quantité de matière?

A l'exception des rapports stœchiométriques, on retrouve bien dans la quasi totalité des réponses tous les éléments attendus mais peu d'enseignants en ont formulé au moins deux. Ces réponses confirment que si le caractère symbolique (ou représentatif) de l'équation est bien perçu, cette symbolisation n'est que rarement associée à ce qu'elle traduit: la conservation de la matière aux niveaux macroscopique et microscopique (voir toutefois Q7). En outre, dans les formulations où l'on ne trouve ni le terme symbolisation ni l'expression "qui traduit", on peut se demander si pour ces enseignants cette équation n'est pas simplement, comme le mentionne explicitement un autre enseignant: "une méthode d'écriture de la transformation ou de la réaction chimique" (voir question suivante).

Q4: Que signifient pour vous les symboles utilisés en chimie et dans l'équation chimique?

Ces symboles représentent-ils pour les enseignants simplement un langage universel permettant de représenter les substances chimiques ou sont-ils des moyens pour lier les niveaux microscopique et macroscopique et permettre ainsi une lecture de l'équation dans les deux niveaux.

En réponse à cette question, huit enseignants disent que c'est une simplification, une facilité, un langage universel pour représenter le nom des substances (5) ou les atomes et les molécules (3), par exemple: "Les symboles sont des représentations pour simplifier les noms des atomes que l'on va utiliser dans la formules d'une molécule ou dans une équation", "Simplification/représentation des noms". Cela confirme notre impression signalée lors de l'analyse des réponses aux questions 1 et 3. Un seul semble approcher la notion de modèle en indiquant que ce n'est pas la réalité: "Une simple représentation de l'entité mais pas la réalité c'est juste pour fixer les idées". Deux situent uniquement cette représentation à l'échelle atomique ou moléculaire (Une simplification utile des atomes et des molécules) et cinq enseignants ont fait le lien entre les registres macroscopique et microscopique: "Les symboles représentent soit une entité chimique (atome, molécule, ion), soit une mole d'entité chimique".

Pour la majorité des enseignants, la symbolisation ne semble pas reposer sur la nécessité d'une circulation entre les différents niveaux d'interprétation de la chimie.

*Les connaissances pédagogiques: Choix méthodologiques de présentation des objets d'enseignement*

Q5: Quelles méthodes utilisez-vous pour introduire le concept de réaction chimique?

L'objectif de cette question est de savoir si les enseignants introduisent le concept de réaction chimique à partir de la réalisation d'expériences monstratrices de certains phénomènes à partir desquels on en généralise une définition (démarche inductive) ou s'ils utilisent une autre méthode.

La majorité des enseignants (10) dit introduire la réaction chimique à partir de la réalisation d'expériences, démarche qualifiée d'expérimentale, de pratique et, à juste raison par l'un d'eux, d'inductive, ce qui est conforme aux IO et au contenu du manuel. Ces expériences sont celles figurant dans le manuel ou le programme et ont pour finalité de faire apparaître un changement des propriétés perceptives, et donc de la nature des corps chimiques, au cours d'une transformation chimique. Six enseignants disent introduire le concept de réaction chimique (et un la différence entre transformations physique et chimique) à partir d'exemples de la vie courante et seulement deux parlent ensuite de la réalisation d'expériences. On peut alors se demander si, pour les autres, ces exemples donnent lieu à une réalisation expérimentale effective ou s'il s'agit de la simple description des exemples figurant dans le manuel (par exemple la formation de la rouille)? Un questionnement du type "Pourquoi le fer exposé à l'humidité rouille? " est injustement qualifié par l'un d'entre eux de situation problème, en effet, une situation problème entraîne qu'une démarche d'investigation soit mise en œuvre par les élèves pour répondre à la question et non que la réponse soit simplement apportée par l'enseignant

après avoir, en posant les questions adéquates, guidé les élèves vers cette réponse.

Q6: Quelles méthodes utilisez-vous pour introduire le concept d'équation chimique dans votre enseignement?

L'objectif de cette question est d'identifier les stratégies mises en place par les enseignants pour expliquer aux élèves ce que représente la symbolisation des substances à l'aide de formules et de leur faire comprendre la signification d'une équation chimique afin qu'ils puissent l'utiliser de façon appropriée pour le traitement quantitatif de la transformation chimique.

Deux stratégies principales semblent être adoptées. L'une consiste d'abord à utiliser les modèles moléculaires, vraisemblablement dans le but (non formulé explicitement par les enseignants) d'insister sur la conservation des atomes (5/17), puis plusieurs exemples d'équations. La priorité est donc donnée à la lecture microscopique de l'équation de réaction. L'autre s'intéresse à une progression dans la représentation d'une expérience (par exemple fer + soufre, réaction de combustion) au niveau macroscopique (6+2): utilisation de la nomenclature (schéma de réaction) puis représentation symbolique des entités chimiques et enfin, ce qui n'est explicitement indiqué que par deux enseignants, équilibrer l'équation chimique. Mais rien n'est dit sur la double lecture possible de cette équation. Pour l'un d'entre eux c'est le niveau atomique et moléculaire qui est explicitement envisagé. Deux enseignants disent introduire l'équation de réaction à partir des lois de conservation de la masse et des atomes: ce qui correspond au double aspect macroscopique et microscopique de l'équation.

Q7: Sur quels points insistez-vous en l'enseignant?

L'objectif est d'identifier le principal sens que donnent les enseignants à l'équation de réaction. Traduit-elle une conservation? Indique-t-elle les rapports dans lesquels se transforment les réactifs et se forment les produits? Permet-elle la liaison entre les niveaux macroscopique et microscopique? Symbolise-t-elle une réaction chimique? Etc.

C'est avant tout la traduction des principes de conservation de la masse et/ou des atomes que représente cette équation (10 enseignants), ce qui doit atténuer le commentaire formulé lors de l'analyse des réponses à la question 3. Cependant seuls deux d'entre eux mentionnent, soit les coefficients stœchiométriques, soit l'équilibrage de l'équation. Deux enseignants insistent sur la double signification macroscopique et microscopique de l'équation (Conservation de la masse à l'échelle macro et conservation de nombre d'atomes de chaque espèce à l'échelle microscopique), et quatre semblent assimiler l'équation à la transformation/réaction chimique en faisant référence au domaine empirique ("Sur les expériences"; "La distinction entre les réactifs et les produits"; "L'apparition de nouveau corps"). On constate une nouvelle fois que la différence entre la réaction chimique modélisant la transformation expérimentale observée à l'échelle macroscopique et sa représentation symbolique n'est pas réalisée par certains enseignants.

*Connaissances didactiques: Regard des enseignants sur le rapport des élèves au savoir*

Q8: A votre avis y a t-il des difficultés à enseigner la réaction chimique? De quels types?

La question a pour objectif de mettre en évidence dans quelle mesure les enseignants ont conscience de la difficulté à enseigner le concept de réaction chimique du fait qu'il intègre plusieurs concepts sous-jacents.

Seuls deux enseignants disent ne pas rencontrer de difficulté pour enseigner la réaction chimique. Pour les 13 autres enseignants ayant donné leur avis, les problèmes sont:

- d'origine expérimentale : manque de matériel ou de produits pour réaliser ou faire réaliser par les élèves des expériences (3); difficultés dans l'identification par les élèves d'une réaction chimique (2), "Certains produits de réaction sont difficiles à mettre en évidence ou difficultés à expliquer comment des corps disparaissent et d'autres corps apparaissent"; manque de réalisation d'expérience susceptibles d'intéresser les élèves (1), "Les difficultés découlent de la rupture entre ce qu'on enseigne et la vie quotidienne. La chimie est traitée d'une façon magistrale";

- d'origine conceptuelle (3): confusion entre réaction chimique et transformation physique, compréhension des noms des substances et leur écriture symbolique; confusion entre coefficients stœchiométriques et indices;

- liés au traitement quantitatif de la transformation/réaction chimique (4) dont: "Oui car les élèves pensent à ce que la masse n'est pas conservée" et "Comprendre la différence entre réactif en excès ou en défaut".

Q9: Sentez-vous des difficultés au niveau de l'élève ? De quels types?

Ici ce sont les difficultés que les enseignants ont identifiées chez leurs élèves au cours de leur expérience d'enseignant que nous voulons mettre en évidence?

On retrouve dans les difficultés pressenties au niveau des élèves certaines difficultés d'origine conceptuelle déjà mentionnées ci-dessus, comme la symbolisation des entités chimiques (4), par exemple: "pourquoi on donne pour le sulfure de fer la formule FeS et non SFe", "l'élève est choqué par les symboles, les produits, et le langage scientifique introduit tout d'un coup en 1<sup>ère</sup> année", auxquelles s'ajoutent des difficultés liées à l'écriture d'une équation chimique et au sens à lui donner (6) (écriture, équilibre, confusions): "L'équilibre des équations en utilisant les coefficients stœchiométriques", "Distinguer les corps qui réagissent et ceux qui apparaissent". Mais c'est au niveau du traitement quantitatif de la réaction chimique que le plus grand nombre d'enseignants (8) envisage des difficultés (proportions stœchiométriques, réactif en excès ou en défaut, applications, niveau mathématique): "Les proportions stœchiométriques; quantités de matières des réactifs qui ont réagi et des produits obtenus; les réactifs en excès", "L'élève croit que l'équation chimique est une équation mathématique. Par exemple:  $Fe + S \rightarrow FeS$  (1mol+1mol  $\rightarrow$  1mol). Pour lui 1mol+1mol  $\rightarrow$  2mol (somme) ". De façon générale, c'est la détermination

des quantités de matière des réactifs qui ont réagit et des produits formés qui semble poser le plus de problèmes.

Q10: A votre avis quelles sont les origines de ces difficultés?

Est-ce que les enseignants se mettent en cause, mettent en cause leur méthode d'enseignement, le curriculum prescrit ou même l'épistémologie de la discipline pour expliquer les difficultés que peuvent rencontrer les élèves? Ou bien pensent-ils que seuls les élèves en sont responsables?

On constate que si les enseignants sont conscients de certaines difficultés que les élèves peuvent rencontrer, ils ont par contre du mal à expliquer leurs origines: 5 ne répondent pas à la question. Parmi les réponses fournies par les autres enseignants on relève, dans l'ordre d'importance des citations:

- L'organisation du curriculum (10 citations): l'emplacement dans le programme et l'horaire consacré à l'enseignement (La durée de l'enseignement et l'emplacement dans le programme (la fin de première année), qui ne permet pas de proposer aux élèves un nombre d'exercices d'application suffisant (4 citations), ou le manque de matériel et de produits chimiques (1 citation);

- Les difficultés inhérentes à l'enseignement de la chimie (4 citations): son langage (La présentation de la matière et la langue présentent des difficultés aux élèves), sa modélisation au niveau microscopique (Comme on n'arrive pas à observer ou à suivre ce qui se passe à l'échelle microscopique, l'élève accepte difficilement ce concept) et sa symbolisation (Ils ne connaissent pas les modèles moléculaires);

- La responsabilité des élèves (3 citation) qui ne travaillent pas assez ou le "manque d'imagination aux niveaux des esprits des élèves car ils ne réalisent pas les invisibles", "... le manque de culture scientifique". Comment peut-on dire qu'ils manquent de culture scientifique ou d'imagination pour percevoir la modélisation à l'échelle microscopique alors que c'est leur premier contact avec ces notions? N'est-ce pas à l'enseignant d'aider l'élève dans la construction de ces connaissances complexes?

Aucun enseignant n'a fait référence au contenu du programme ou à la méthode d'enseignement adoptée.

Q11: Comment peut-on les dépasser?

Les réponses fournies par douze enseignants à cette question sont étroitement liées à celles données à la question précédente, en voici quelques exemples: "L'enseigner au début de l'année et ajouter 4 heures pour faire plus d'application", "On doit cultiver l'imagination des élèves ...", "Insistez beaucoup plus sur la façon d'écrire les formules", "Introduire ces concepts progressivement et simplifier le langage d'enseignement", "Insister sur des exemples de la vie courante".

Il est indéniable que la place de cet enseignement dans le cursus, le temps et le réinvestissement des connaissances dans des activités d'application, qu'une réflexion sur les formules représentatives des réactifs et des produits, ne peut que renforcer l'intégration des nouveaux objets de savoir appris. Les quelques propositions qui font référence à une remise en cause du curriculum prescrit ou à un changement de méthode

d'enseignement ne peuvent en effet que permettre, comme le souhaite un enseignant, de "cultiver l'imagination" ou le raisonnement chez les élèves.

### **Discussion**

Si l'on considère que le rapport au savoir à enseigner peut être représenté par les connaissances constitutives de la PCK des enseignants, on peut constater que ces connaissances sont parfois déficientes sur plusieurs points. Ce qui peut s'expliquer par le fait que la construction par les enseignants tunisiens de leur PCK repose exclusivement sur leur expérience d'enseignement.

En ce qui concerne les connaissances disciplinaires, les enseignants ne perçoivent pas la nécessité de préciser, d'une part que l'on a à faire à des corps purs, simples ou composés, ou à des solutions contenant des ions, d'autre part à insister sur la conservation dans le changement. Certains font la confusion entre le niveau macroscopique (la réaction) et le niveau symbolique (l'équation chimique). La symbolisation des composés chimiques par leur formule, puis de la réaction chimique par une équation, apparaît pour beaucoup comme correspondant à une simple représentation (une commodité) des noms ou d'un phénomène par des symboles. L'utilisation des modèles moléculaires (leur représentation graphique plus exactement) pour interpréter la transformation en termes de réorganisation des atomes conduisant à la formation de nouvelles molécules ou d'ions n'apparaît pas dans leurs réponses. On peut donc faire l'hypothèse que si les élèves ont des difficultés à circuler entre les différents niveaux d'interprétation de la chimie (macroscopique, microscopique et symbolique), c'est en partie parce que l'enseignant n'est pas habitué à le faire d'une façon progressive et surtout explicite.

Du côté des connaissances pédagogiques relatives à l'enseignement de la réaction chimique, on peut dire que les démarches d'introduction des connaissances adoptées par les enseignants sont conformes à celles préconisées dans le manuel: démarche inductive allant de la présentation d'expérience à leur description en termes de corps chimiques identifiés par leur nom, puis à la définition en termes de changement de natures des corps; utilisation des modèles moléculaires pour introduire la lecture microscopique de la réaction chimique en termes de conservation des atomes (justification des coefficients stœchiométriques); démarche implicite consistant à déduire, lors de l'écriture du schéma de réaction, le nom des produits de celui des réactifs, puis traduction de ces noms en utilisant les formules représentatives et enfin "équilibrage" de l'équation chimique. On ne dégage pas des réponses données d'intention d'insister auprès des élèves sur le passage de la nomenclature aux symboles (peut-être est-ce un savoir faire supposé maîtrisé?) et de discuter du rôle et de la place de la symbolisation.

Pour ce qui est des connaissances didactiques, les difficultés d'apprentissage que sont susceptible de rencontrer les élèves relevées par les enseignants sont essentiellement des savoir-faire (connaissances opératoires) liées à la résolution d'exercices (équilibrer l'équation chimique, proportions stœchiométriques et réactif limitant, traitement mathématique). Peu de difficultés conceptuelles liées à la nomenclature, la modélisation et à

la symbolisation sont signalées. Peu d'idées émergent sur l'origine possible de ces difficultés et la manière de les prendre en compte. Ils sont peu nombreux à faire référence à la complexité des nouvelles connaissances introduites (leur caractère abstrait), à émettre un avis sur le savoir prescrit et à proposer d'autres méthodes d'enseignement.

Bien que la généralisation puisse être discutée compte tenu du faible nombre d'enseignants interrogés et du mode de questionnement, les réponses fournies par les enseignants font apparaître une conformité de leur conception de la réaction chimique avec le savoir prescrit (I.O. et manuel scolaire) et une relation étroite de la (les) méthode(s) à adopter pour l'enseigner avec le contenu du manuel officiel. Cela peut s'interpréter en considérant qu'ils ne se permettent pas, peut-être parce qu'ils n'osent pas s'éloigner du discours officiel, d'avoir une marge de liberté dans l'élaboration de situations d'apprentissage. Mais une autre explication possible serait liée au déficit de connaissances didactiques et pédagogiques observé dans leur PCK. Notre étude tendrait à conforter l'observation déjà faite (par exemple Rollnick et al, 2008) selon laquelle les enseignants ayant des connaissances disciplinaires faibles possèdent peu de connaissances relative à la mise en œuvre du savoir en leur permettant de tenir compte des difficultés de ses élèves et de leurs conceptions.

### **Conclusion**

Pour les élèves tunisiens de première année qui suivaient jusqu'à ce niveau un enseignement arabisant de la discipline, à la difficulté de la langue française s'ajoute la complexité du langage de la chimie. L'élève se trouve donc placé devant différentes exigences : comprendre le sens des phrases de la langue française en elle-même, comprendre les concepts de la discipline et pouvoir s'exprimer dans cette langue avec une rigueur scientifique. On exige beaucoup des élèves pour qui le temps d'apprentissage est différent du temps didactique consacré à l'enseignement.

En étant tout à fait d'accord avec plusieurs auteurs qui estiment que le concept de substance (nous dirons plutôt d'espèce chimique) est un concept central dans l'enseignement de la transformation chimique, nous pensons qu'il faudrait insister dans la définition de la réaction chimique sur la transformation des substances (espèces chimiques) de départ pour donner de nouvelles substances (de nouvelles espèces chimiques) en se référant aux concepts de mélange, corps purs simples ou composés, ions en solution. En se centrant sur les interactions entre les espèces mises en présence et en proposant aux élèves une discussion sur l'interprétation des phénomènes observés, en favorisant le développement du vocabulaire nécessaire pour communiquer à propos des réactions chimiques dans le registre macroscopique, cela permettrait à l'enseignant de conduire les élèves à percevoir ce qui se conserve et ce qui se transforme dans le changement et à ne pas se contenter d'identifier une réaction chimique à une modification/un changement des propriétés perceptives. Le registre des modèles viendra ensuite pour donner du sens à beaucoup de concepts clés en chimie et en particulier pour permettre l'interprétation d'un processus

chimique comme recombinaison/réarrangement des atomes présents dans les réactifs lorsqu'ils se transforment en produits.

Pour favoriser la compréhension du véritable sens de l'équation de réaction devraient-êtré proposées aux élèves des activités ayant pour objectif l'explication des phénomènes en insistant sur le langage symbolique, sa signification dans les registres microscopique et macroscopique et ses règles d'écriture. Etre capable de lire une formule chimique, être capable d'écrire une formule chimique à partir de la connaissance des atomes présents dans la molécule, être capable d'écrire un bilan qualitatif à partir de renseignements sur la réaction, être capable de lire une équation de réaction et être capable d'ajuster les coefficients d'une équation de réaction sont des compétences préalables nécessaires à la résolution de tout problème de chimie. Favoriser le développement du vocabulaire nécessaire pour communiquer à propos des réactions chimiques, aider les élèves à être capables de différencier les différents niveaux de représentation de la chimie puis de passer de l'un à l'autre, permettrait de diminuer la complexité de compréhension de la transformation chimique et de son équation de réaction.

Ensuite, l'activité de résolution de problèmes doit faire partie intégrante de l'enseignement-apprentissage de la chimie (Nakhleh et Mitchell, 1993). Elle devrait être précédée par des activités de nature conceptuelle permettant aux élèves de donner du sens aux différents concepts mis en jeu (quantité de matière, coefficients stœchiométriques, proportions stœchiométriques, réactif limitant), aux relations entre les grandeurs qui les représentent, à leurs unités et à leur relation avec le registre des modèles. Nous suggérons de concevoir un apprentissage progressif utilisant des problèmes numériques de complexité croissante en expliquant clairement les différentes étapes du processus de la résolution tant nécessaire aux débutants. Expliquer la signification des rapports entre quantités diverses (expression littérale, analyse dimensionnelle, conversion d'unités), utiliser un vocabulaire correct (par exemple :  $n$  représente la quantité de matière dont l'unité est la mole) et des symboles clairs, non ambigus devrait permettre aux élèves d'avoir conscience de la pertinence de la mise en relation des données du problème et de concevoir une stratégie de résolution adaptée.

Il résulte de tout cela que, dans le but de développer les PCK des enseignants, relatives à la réaction/transformation chimique il serait utile de leur fournir, lors de séances de formation continue, des outils leur permettant d'acquérir une posture réflexive sur les savoirs à enseigner, les difficultés que les élèves sont susceptibles de rencontrer pour se les approprier, la façon dont ils les enseignent et l'influence de leur pratique sur les conceptions induites chez les élèves. Pour cela, en nous inspirant du travail de Kermen et Méheut (2008), on pourrait par exemple placer les enseignants face aux réponses données par les élèves à un questionnaire ayant comme objectif d'évaluer leur niveau d'appropriation du langage de la chimie et/ou à un exercice destiné à évaluer leur capacité à mobiliser les connaissances adéquates pour sa résolution et/ou à un entretien dont l'objectif est de comprendre comment les élèves décrivent, perçoivent, et représentent une transformation chimique réalisée devant eux (Mzoughi, 2011). Une discussion collective de ces réponses ne pourrait qu'être

bénéfique au développement de leurs connaissances professionnelles. La formation devrait en outre permettre aux enseignants d'acquérir la capacité d'auto-observation des situations de classe afin de repérer les conceptions alternatives ou les incompréhensions des élèves dans le but d'en tenir compte dans la mise en place de leur enseignement.

### **Références**

Agung, S. et M.S. Schwartz (2007). Students' understanding of conservation of matter, stoichiometry and balancing equation in Indonesia. *International Journal of Science Education*, 29, 13, 1679-2002.

Barlet, R. (1999). L'espace épistémologique et didactique de la chimie. *L'actualité Chimique*, avril, 22-33.

Ben-Zvi, R.; Eylon, B-S. et J. Silberstein (1988). Theories, principles and laws. *Education in Chemistry*, may, 89-92.

Boujaoude, S. et H. Barakat (2003). Students' problem solving strategies in stoichiometry and their relationships to conceptual understanding and learning approaches. *Electronic Journal of Science Education*, 7, 3. Dans <http://ejse.southwestern.edu/>.

Bucat, R. (2004). Pedagogical Content Knowledge as a way forward: applied research in chemistry education. *Chemistry Education Research and Practice*, 5, 3, 215-228.

Cassirer, E. (1910). *Substance et fonction, éléments pour une théorie du concept*. Édition française, traduit de l'allemand par P. Caussat, 1977. Paris: Editions de Minuit.

Chevallard, Y. (1989). Le concept de rapport au savoir. En *Séminaire de didactique des mathématiques et de l'informatique* (211-235). Grenoble: LSD-IMAG, Institut Fourier.

Chevallard, Y. (1999). L'analyse des pratiques enseignantes en théorie anthropologique du didactique. *Recherches en Didactique des Mathématiques*, 19, 2, 221-266.

Davous, D.; Féoré, M.C.; Fort, L.; Lévêque, T.; Mauhourat, M.B. et J.P. Perchard (1999). Transformation chimique d'un système: le modèle de la réaction chimique. *Bulletin de l'Union des Physiciens*, 817, 3-35.

De Vos, W. et A. Verdonk (1985). A new road to reactions 1. *Journal of Chemical Education*, 62, 3, 238-240.

De Jong, O. et J. Van Driel (2004). Exploring the development of student teachers' PCK of the multiple meaning of topics. *International Journal of Science and Mathematics Education*, 2, 477-491.

Dumas Carré, A. et M. Goffard (1998). Objectivation des pratiques de tutelle d'un enseignant au cours de séances de résolution de problèmes en physique. En *Tutelle et médiation dans l'éducation scientifique*, A. Dumas Carré et A. Weil-Barais (Eds). Paris-Bruxelles: Peter Lang.

Fach, M.; de Boer, T. et I. Parchmann (2007). Results of an interview study as basis for the development of stepped supporting tools for

stoichiometric problems. *Chemistry Education Research and Practice*, 8, 13-31.

Gauchon, L. et M. Méheut (2007). Learning about stoichiometry: from students' preconceptions to the concept of limiting reactant. *Chemistry Education Research and Practice*, 8, 362-375.

Geddis, A.N. et E. Wood (1997). Transforming subject-matter and managing dilemmas: A case study in teacher education. *Teaching and Teacher Education*, 13, 611-626.

Halbwachs, F. (1973). L'histoire de l'explication en physique. En *L'explication dans les sciences*. Paris: Flammarion.

Hesse, J. J. et C.W. Anderson (1992). Students' conceptions of chemical change. *Journal of Research in Science Teaching*, 29, 3, 277-299.

Jacob, C. (2001). Analysis and synthesis: interdependent operation in chemical language and practice. *Hyle*, 7, 1, 31-50.

Johnstone, A. H. (2000). Developing student's understanding of chemical change – What should we be teaching? *Chemistry Education: Research and Practice in Europe*, 1, 77-90.

Kermen, I. et M. Méheut (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.

Khanfour-Armalé, R. et J.F. Le Maréchal (2009). Représentations moléculaires et systèmes sémiotiques. *ASTER*, 48, 63-88.

Kousathana, M. et G. Tsaparlis (2002). Students' error in solving numerical-equilibrium problems. *Chemistry Education Research and Practice*, 3, 5-17.

Krnel, D.; Watson, R. et S.A. Glazar (1998). Survey of research related to the development of the concept of 'matter'. *International Journal of Science Education*, 20, 3, 257-289.

Larcher, C. (1994). Point de vue à propos des équilibres chimiques. *Aster*, 18, 57-62.

Laszlo, P. (1993). *La parole des choses ou le langage de la chimie*. Paris: Hermann.

Laugier, A. et A. Dumon (2003). A la recherche des obstacles épistémologiques à la construction du concept d'élément chimique par les élèves de seconde. *Didaskalia*, 22, 69-97.

Martinand, J.-L. (1995). Introduction à la modélisation. En *Didactiques des Disciplines Techniques* (126-138), Cachan: Lirest.

Le Marechal, J.F. (1999). Design of chemistry labwork activities aiming basic chemical concepts. En *Actes of Fourth European Science Education Summer School* (68-80). Marly le Roi, 1998.

Méheut, M. (1989). Des représentations des élèves au concept de réaction chimique ; premières étapes. *Bulletin de l'Union des Physiciens*, 716, 15-26.

Méheut, M. (2006). Recherches en didactique et formation des enseignants de sciences. En Eurydice (Ed), *L'enseignement des sciences dans les établissements scolaires en Europe. Etat des lieux des politiques et de la recherche* (55-76). Bruxelles: Eurydice. Dans <http://www.eurydice.org>.

Mestrallet, R. (1980). *Communication, linguistique et sémiologie: contribution à l'étude de la sémiologie des systèmes de signes de la chimie*. Thèse de l'Université Autonome de Barcelona, vol. 2, p. 501.

Mzoughi, I. (2011). *Le premier apprentissage (conceptualisation et modélisation) de la transformation chimique au lycée en tunisie : du savoir à enseigner au savoir appris*. Thèse de l'université de Tunis.

Psarros, N. (1996). La filosofia della chimica dal punto de vista costrucivistico. *Epistemologia*, 18, 27-38.

Renstrom, L.; Andersson, B. et F. Marton (1990). Students' conceptions of matter. *Journal of Educational Psychology*, 82, 555-569.

Robardet, G. et J.C. Guillaud (1994). *Eléments d'épistémologie et de didactique des sciences physiques, De la recherche à la pratique*, Tome 1. Grenoble: Publication de l'IUFM.

Rollnick, M.; Bennett, J.; Rhemtula, M.; Dharsey, N. et T. Ndvolu (2008). The place of Subject Matter Knowledge in Pedagogical Content Knowledge: a case study of South African teachers teaching the amount of substance and chemical equilibrium. *International Journal of Science Education*, 30, 10, 1365-1387.

Sanger, M.J. (2005). Evaluating students' conceptual understanding of balanced equations and stoichiometric ratios using a particulate drawing. *Journal of Chemical Education*, 82, 131-134.

Schmidt, H.J. (1994). Stoichiometric problem solving in high school chemistry. *International Journal of Science Education*, 16, 2, 191-200.

Shulman, L.S. (1986). Those who understand: knowledge growth in teaching. *Educational Researcher*, 15, 2, 4-14.

Stavridou, H. et C. Solomonidou (1989). Physical phenomena - chemical phenomena: do pupils make the distinction? *International Journal of Science Education*, 11, 83-92.

Stavridou, H. et C. Solomonidou (1998). Conceptual reorganization and the construction of chemical reaction concept during secondary education. *International Journal of Science Education*, 20, 205-221.

Taber, K.S. (2001). Building the structural concepts of chemistry: some considerations from educational research. *Chemistry Education: Research and Practice in Europe*, 2, 2, 123-158.

Tiberghien, A. (1994). Modeling as a basis for analysing teaching-learning situations. *Learning and Instruction*, 4, 71-87.

Van Driel, J.H.; Verloop, N. et W. de Vos (1998). Developing science teachers' Pedagogical Content Knowledge. *Journal of Research in Science Teaching*, 35, 6, 673-695.