



**HAL**  
open science

## Utiliser une simulation pour enseigner l'équation de réaction : étude de cas

Léana Détouillon

► **To cite this version:**

Léana Détouillon. Utiliser une simulation pour enseigner l'équation de réaction : étude de cas. Education. 2022. dumas-03784073

**HAL Id: dumas-03784073**

**<https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-03784073>**

Submitted on 22 Sep 2022

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

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



Distributed under a Creative Commons Attribution - NonCommercial - NoDerivatives 4.0 International License

## Mémoire de recherche

# Utiliser une simulation pour enseigner l'équation de réaction : étude de cas.

Léana Détouillon – M2 MEEF PC

*Mots-clés : chimie, équation de réaction, enseignement secondaire, modélisation, simulation*

*Keywords: chemistry, reaction equation, secondary education, modelling, simulation, mock-up*

### Résumé :

*L'équation de réaction est un outil de modélisation essentiel au chimiste. Cependant, la recherche en didactique montre que les élèves du secondaire peinent à la comprendre et à l'utiliser. À l'ère du numérique, une simulation informatique serait-elle la solution pour mieux enseigner cette partie des programmes scolaires ?*

*Afin de réunir les connaissances utiles pour ce travail de recherche, un premier recueil d'informations dans la littérature est réalisé dans les domaines de la chimie et de la didactique. La notion de modèle est explicitée, au niveau scientifique et au niveau scolaire. La place de l'équation de réaction dans les programmes du secondaire est ensuite détaillée, ainsi que les principaux obstacles didactiques rencontrés par les apprenants. Les types de simulations utilisées dans l'enseignement sont également présentées, ainsi que leurs caractéristiques.*

*Après avoir émis une question de recherche, le protocole expérimental mis en œuvre dans ce mémoire est explicité. L'objectif de l'expérience présentée ici est de comparer les effets de deux activités en classe de quatrième où les élèves découvrent le modèle de l'équation de réaction. Dans un cas, l'activité est réalisée avec une simulation. Dans l'autre cas, des objets tangibles sont mis en œuvre. Les résultats recueillis sont mis en parallèle de la littérature tout en étant analysés et discutés. Le raisonnement est achevé par une conclusion en faveur de la simulation, mais des nuances et des propositions d'ouverture sont à prendre en compte.*

### Abstract:

*The reaction equation is an essential modelling tool for the chemist. However, research in didactics shows that secondary school students struggle to understand it and to use it. In the digital age, would a computer simulation be the solution to teach better this part of the curriculum?*

*In order to collect useful knowledge for this research work, a first collection of information in the literature is done in the domains of chemistry and didactics. The concept of model is elucidated, at the levels of science and education. Then, the place of the reaction equation in the secondary curriculum is explained, together with the main didactics' problems met by the students. Simulation types used in teaching are also presented, as well as their characteristics.*

*After having issued a research question, the experimental protocol implemented in this essay is elucidated. The objective of the experience showed here is to compare the effects of two activities leaded in middle school where pupils discover the reaction equation model. On one hand, the activity is realized with a simulation. On the other hand, tangible objects are used. The results are compared to the literature while being analyzed and discussed. The reasoning is completed with a conclusion in favor of the simulation, but slight differences and openings must be taken in consideration.*

## Remerciements

Je remercie Géraldine Boivin-Delpieu de m'avoir accompagnée et soutenue au commencement de ce travail de mémoire et pour la constitution de la bibliographie, qui étaient des tâches inédites pour moi.

Je remercie également Fabrice Guyon pour son aide précieuse dans la construction du protocole expérimental et dans l'analyse des résultats.

Enfin, je tiens à remercier Catherine Tabourot, pour son accueil chaleureux au collège Albert Mathiez qui m'a permis de recueillir toutes les données nécessaires pour ce mémoire.

## Sommaire

I) Introduction.....	4
II) Cadres théoriques .....	5
1) L'équation de réaction vue par les chimistes.....	5
a) La modélisation en sciences.....	5
b) La modélisation d'une transformation chimique.....	5
2) La chimie dans l'enseignement secondaire.....	9
a) La démarche d'enseignement-apprentissage .....	9
b) L'équation de réaction dans les programmes du secondaire .....	11
c) Les difficultés rencontrées par les élèves face à l'équation de réaction .....	12
3) Le numérique dans la classe.....	15
a) Les TICE.....	15
b) Les simulations .....	16
III) Question de recherche.....	18
IV) Méthodologie.....	19
1) Présentation de la simulation .....	19
2) Protocole expérimental.....	21
a) Test préliminaire.....	21
b) Activité de découverte .....	22
c) Séance d'institutionnalisation et test final.....	25
V) Résultats.....	26
1) Premières impressions en séance .....	26
2) Résultats du test préliminaire .....	28
a) Pourcentages de réussite moyens.....	28
b) Détails des questions.....	28
3) Résultats du test final.....	30
a) Pourcentages de réussite moyens.....	30
b) Détails des questions.....	30
VI) Discussion.....	42
1) Conclusion de l'étude de cas.....	42
2) Discussion sur le protocole expérimental .....	43
VII) Conclusion.....	43
VIII) Annexes.....	46
IX) Bibliographie.....	54

## I) Introduction

Les sciences physiques sont souvent perçues comme difficiles à appréhender par les élèves et par leurs parents. Je ne compte plus le nombre de fois où j'ai entendu des camarades ou des adultes évoquant leur jeunesse dire « *Les sciences, c'est trop compliqué. Je n'aime pas ça, je ne comprends rien en classe.* ». La plupart du temps, ces personnes ont eu un mauvais premier contact avec cette discipline, et de cet instant naît un blocage qui rend l'apprenant hermétique à la physique-chimie. Une fois adulte, cet élève voit toujours la science comme un domaine mystique, et il ne se rend pas compte qu'il en rencontre des applications au quotidien. Alors, le fonctionnement de certains objets techniques ainsi que l'explication de phénomènes naturels sont pour lui abscons.

C'est entre autres ce constat qui m'a poussée à devenir enseignante. Mon vœu le plus cher serait d'ouvrir la physique-chimie à un maximum d'élèves, ou si cela n'est pas possible, de les réconcilier avec les sciences. Pour être efficace, ce travail doit être entrepris dès le collège, et poursuivi au lycée. Un exemple de notion étudiée tout au long du secondaire et pourtant difficile à acquérir par les élèves est l'équation de réaction. Cette écriture, utilisée par les chimistes pour modéliser les transformations chimiques, est présentée aux élèves au cycle 4. Ce savoir est ensuite consolidé en seconde afin que les élèves maîtrisent cet outil en première et en terminale pour leur enseignement de spécialité.

Lors de mes premières expériences d'enseignement, j'ai remarqué que l'acquisition d'un modèle pouvait être travaillée de plusieurs façons. J'ai retenu deux méthodes principales : par la manipulation d'objets tangibles, et par l'utilisation d'outils numériques. Les objets tangibles correspondent au matériel utilisé habituellement en travaux pratiques, comme des instruments de mesure analogiques ou des maquettes. Les outils numériques désignent quant à eux un domaine plus vaste, dans lequel je choisis les simulations comme outil de travail. Mes objectifs pour ce mémoire sont donc de :

- Déterminer si une situation d'apprentissage avec des objets tangibles permet de comprendre le modèle de l'équation de réaction.
- Déterminer si une situation d'apprentissage avec une simulation numérique permet de comprendre ce même modèle.
- Le cas échéant, en déduire l'outil le plus efficace parmi les deux précédents pour faire acquérir les connaissances visées aux élèves.

Je commencerai par établir les cadres théoriques structurants, en déterminant ce que sont les modèles et la modélisation, d'abord de façon très générale en sciences, puis plus précisément en chimie. Je présenterai alors l'équation de réaction, modélisation de la transformation chimique, avec un rapide historique puis en expliquant les informations que cette écriture transmet. Cela me conduira à établir un schéma représentatif des différents niveaux de description en chimie appliqué à l'équation de réaction.

Dans une deuxième partie, j'expliquerai quelle est la transposition didactique de la démarche scientifique prescrite pour les élèves du secondaire. Je montrerai ensuite comment l'équation de réaction est travaillée en classe d'après les derniers Bulletins Officiels, puis je listerai les difficultés principales rencontrées par les élèves en m'appuyant sur la recherche en didactique.

Enfin, je consacrerai une partie aux TICE, et plus précisément aux simulations, en détaillant leurs caractéristiques et leur utilisation en classe. Cela me conduira à une question de recherche pour ce mémoire.

La méthodologie de l'expérimentation menée sera ensuite présentée. Pour cette expérience, je comparerai deux activités de modélisation dans deux classes de quatrième. Une activité sera menée

avec des objets tangibles, et la seconde avec une simulation. Je présenterai donc en détail la simulation utilisée, ainsi que le déroulement des séances dans les deux classes.

Pour mesurer l'avancée des savoirs dans les deux groupes étudiés, je rassemblerai plusieurs données, à différents moments de l'expérimentation. Un test préliminaire sera réalisé avant l'activité de modélisation, et un second test aura lieu deux semaines après cette séance. Les résultats des deux groupes pourront être comparés, afin de répondre à la question de recherche. Des liens entre ces résultats et les cadres théoriques seront créés lors de leur analyse et de leur discussion, avant d'établir la conclusion de cette étude de cas.

## II) Cadres théoriques

### 1) L'équation de réaction vue par les chimistes

#### a) La modélisation en sciences

Qu'est-ce qu'un modèle et que signifie « modéliser » ? De nombreux chercheurs en didactique se sont penchés sur cette question. Les travaux de Roy et Hasni (2014) nous donnent les définitions de ces termes dans le cadre général des sciences physiques. Je définis donc un modèle comme « *une représentation simplifiée d'une entité du monde réel, un objet intermédiaire entre la théorie et le phénomène dont la fonction est de représenter, d'expliquer et de prédire* ». J'ajoute que le modèle est « *assujéti à des révisions* », ce qui signifie qu'il peut être modifié si des expériences montrent qu'il était partiellement faux ou incomplet, conformément au principe de réfutabilité de Popper.

Les auteurs nous proposent ensuite deux catégories de modèles, que je juge pertinentes pour ce mémoire. Il y a d'un côté les **modèles physiques**, qui sont des montages réalisés avec des objets tangibles ou des images. Les maquettes ou schémas, comme le schéma d'un circuit électrique, en sont des exemples. La représentation donnée par ces modèles peut être comprise des apprenants qui n'ont aucune notion de mathématiques, à l'opposé de la seconde catégorie : les **modèles symboliques**. Ces modèles sont beaucoup plus abstraits et plus difficiles d'accès pour un public novice. Cette catégorie recense toutes les lois mises sous la forme d'équations, comme la loi des gaz parfaits. D'autres exemples de modèles symboliques sont les équations utilisées en mécanique pour décrire le mouvement d'un objet, ou la théorie cinétique des gaz.

Une fois le terme « modèle » défini, le sens de « modélisation » apparaît plus clair. Je m'accorde avec Drouin (1988) pour établir que la modélisation est la démarche de construction du modèle. Roy et Hasni ajoutent que la modélisation est un processus non linéaire, et même cyclique, nécessitant plusieurs allers-retours entre expérience et théorie. Ainsi, pour construire un nouveau modèle, les scientifiques se basent sur les théories préexistantes pour proposer quelque chose de nouveau mais relevant de l'hypothèse. Le modèle est alors testé par confrontation avec l'expérience. Si l'expérience montre que le modèle comportait des erreurs, il est révisé afin de concorder avec la réalité. Le modèle est ensuite considéré comme valide, jusqu'à ce qu'une nouvelle expérimentation le remette en question.

#### b) La modélisation d'une transformation chimique

La chimie est une science qui étudie la constitution et les transformations de la matière. Elle décrit notre environnement à différentes échelles, du niveau macroscopique au niveau subatomique. Elle nous apprend que tout ce qui nous entoure est fait d'atomes qui constituent ensuite des molécules. L'étude de ces structures représente en soi un pan majeur de cette discipline. Cette science permet aussi de prédire l'évolution de divers systèmes, du point de vue qualitatif ou quantitatif. Sans s'en apercevoir, les élèves en rencontrent de nombreuses applications concrètes au quotidien. Mais la

compréhension de ces applications nécessite beaucoup d'abstraction, ce qui représente souvent une difficulté pour les apprenants.

En général, un système évolue car il est le siège d'une transformation chimique. Les espèces chimiques constituant la matière, nommées réactifs, sont transformées en nouvelles espèces appelées produits. Cette transformation implique des ruptures et des créations de liaisons chimiques au sein des espèces. Une condition est nécessaire à la transformation : on considère que la transformation a lieu si les réactifs entrent en contact avec une énergie suffisante. De plus, des aspects cinétiques doivent aussi être pris en compte. Enfin, les espèces chimiques ne réagissent pas toujours dans des proportions un pour un. Les quantités de réactifs et de produits en jeu sont régies par la stœchiométrie.

La modélisation de cette transformation chimique se fait par la réaction chimique, à laquelle les chimistes associent une équation de réaction. Cet outil a nécessité plusieurs siècles d'élaboration pour nous parvenir sous la forme que nous connaissons aujourd'hui.

- **Historique de l'équation de réaction**

La première proposition d'une équation de réaction a été réalisée en 1789 par Lavoisier, dans son *Traité Élémentaire de Chimie*. Dans cette première forme, les espèces chimiques sont considérées comme des substances indécomposables et sont désignées par des noms littéraux : « eau », « alkool », « air fixe ». Lavoisier introduit un signe = pour séparer les réactifs des produits, dont le rôle est de rappeler la conservation de la matière. À ce stade, l'équation ne sert qu'à décrire la réaction de façon qualitative et macroscopique. La notion de stœchiométrie apparaît avec Wenzel et Richter en 1792, introduisant l'aspect quantitatif.

En 1797, Fourcroy et Vauquelin décrivent dans les *Annales de Chimie* l'équation de réaction comme « une formule simple qui n'est au fond qu'un raisonnement mis en forme serrée, comme toutes les formules algébriques », posant les attentes de ce nouveau modèle.

Mais la conception de la matière était encore imprécise à cette époque. Ce n'est qu'en 1808 que Dalton, s'inspirant des atomistes Grecs, établit que la matière est constituée de particules nommées atomes, perçues comme des sphères dures. Dalton propose alors des représentations schématiques de ces atomes, sous la forme de cercles. Berzelius puis Thenard remplaceront ces symboles par des lettres.

Les travaux d'Avogadro en 1811 permettent de fixer la distinction entre atome et molécule. La transformation chimique est alors définie comme une réorganisation des atomes. L'équation de réaction subira beaucoup de modifications par la suite. Au XIXe siècle, les conventions d'écriture sont différentes entre les pays, et même entre les universités au sein d'une même nation. Les règles d'écriture et notamment de nomenclature seront par la suite clairement établies par l'IUPAC dans la deuxième moitié du XXe siècle.

- **Lire une équation de réaction**

Une équation de réaction se lit de gauche à droite. La partie gauche présente les réactifs et la partie droite recense les produits, tous écrits avec leur formule brute et séparés par des +. Pour indiquer les proportions des espèces chimiques dans la transformation, l'équation de réaction comporte des facteurs multiplicatifs, appelés coefficients stœchiométriques, ou nombres

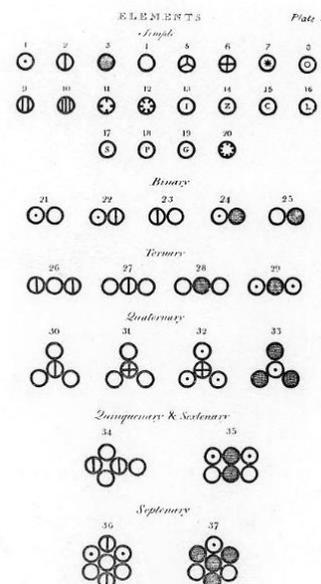
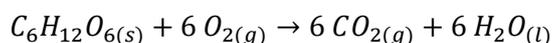


Figure 1 Représentation d'atomes et de molécules selon Dalton

stœchiométriques. Cette écriture représente donc les réactifs et les produits<sup>1</sup>, séparés d'un symbole qui peut être une flèche  $\rightarrow$ , une double flèche  $\rightleftharpoons$  ou un signe égal  $=$ . A première vue, le choix d'un symbole parmi ces trois pourrait relever du détail, mais ce choix est en réalité important pour comprendre la nature de la réaction. La flèche simple signifie que la réaction ne peut se produire que dans un seul sens : les réactifs réagissent pour former les produits, et la réaction inverse n'est pas possible. La double flèche ainsi que le signe égal supposent que les produits peuvent réagir pour former de nouveau les réactifs.



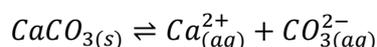
Par exemple, l'équation de réaction ci-dessus est associée à la réaction de combustion du glucose qui modélise la transformation du glucose dans un organisme. Sa traduction en français serait « *Une mole de glucose solide réagit avec 6 moles de dioxygène gazeux et forme de façon irréversible 6 moles de dioxyde de carbone gazeux et 6 moles d'eau liquide.* »

Nous pouvons remarquer plusieurs éléments. En premier, cette équation n'explique pas tous les détails liés à la transformation du glucose. En effet, le glucose fourni par l'alimentation est consommé par l'organisme suivant cette réaction afin de produire de l'énergie. Ces aspects énergétiques n'apparaissent d'aucune façon dans l'équation de réaction, ce qui pose une première limite au modèle.

Ensuite, les différentes espèces chimiques présentent un indice entre parenthèses :

- Le  $(s)$  signifie que le glucose est à l'état solide.
- Le  $(g)$  symbolise l'état gazeux du dioxygène et du dioxyde de carbone
- Le  $(l)$  symbolise l'état liquide de l'eau.

L'équation de réaction permet donc de relier l'aspect macroscopique des espèces à l'interprétation de la réaction. Cependant, il n'est pas obligatoire de faire apparaître ces indices systématiquement. Ils ne sont écrits que dans le cas où un lien avec le caractère macroscopique des substances est utile.



Ce nouvel exemple illustre la dissolution du carbonate de calcium solide dans l'eau. Une double flèche est présente entre les réactifs et les produits, signifiant que la réaction peut se faire en sens inverse. Au niveau macroscopique, cela se traduirait par une précipitation du carbonate de calcium. Enfin, cette équation fait apparaître un nouvel indice :  $(aq)$ , qui symbolise que les ions sont en solution aqueuse.

#### • **Les différents niveaux de description**

Comme nous venons de le montrer, utiliser le modèle de l'équation de réaction nécessite de naviguer entre différents niveaux de description du système chimique. D'après Johnstone (1993, cité par Dehon & Snauwaert, 2015, p212), ces niveaux sont au nombre de trois et peuvent être symbolisés par un triangle. En s'appuyant sur les écrits de Le Maréchal et Bécu-Robinault (2006), et de Dehon et Snauwaert, nous pouvons proposer une version détaillée de ce triangle appliquée à l'équation de réaction (voir page suivante).

Le premier niveau de description est le niveau macroscopique. Comme son nom l'indique, il correspond au monde des expériences, des données perceptibles à l'échelle humaine à l'œil nu ou avec des instruments de mesure. Comme nous l'avons dit, la lecture de l'équation de réaction implique souvent de faire référence aux propriétés des espèces chimiques et de la transformation elle-même. Par exemple, un changement de couleur s'explique par l'apparition ou la disparition d'une espèce, ou

---

<sup>1</sup> Tel que cela est enseigné au secondaire.

la diminution du pH est due à une production d'ions oxonium. Les proportions relatives des réactifs et des produits peuvent aussi être observées à ce niveau.

Les deux autres niveaux de description appartiennent à un domaine plus théorique. Dans le niveau microscopique, les phénomènes sont décrits du point de vue particulière (atomique ou moléculaire). Cette représentation se retrouve dans l'équation de réaction, où les réactifs et produits interviennent sous la forme d'espèces chimiques : atomes, ions, molécules.

Enfin, le niveau symbolique comprend les représentations utilisées par les chimistes comme les formules chimiques (brutes, semi-développées, développées, topologiques). C'est également à cet endroit que des aspects calculatoires et des outils abstraits pourront être rencontrés comme les quantités de matière, l'énergie de la réaction ou des tableaux d'avancement.

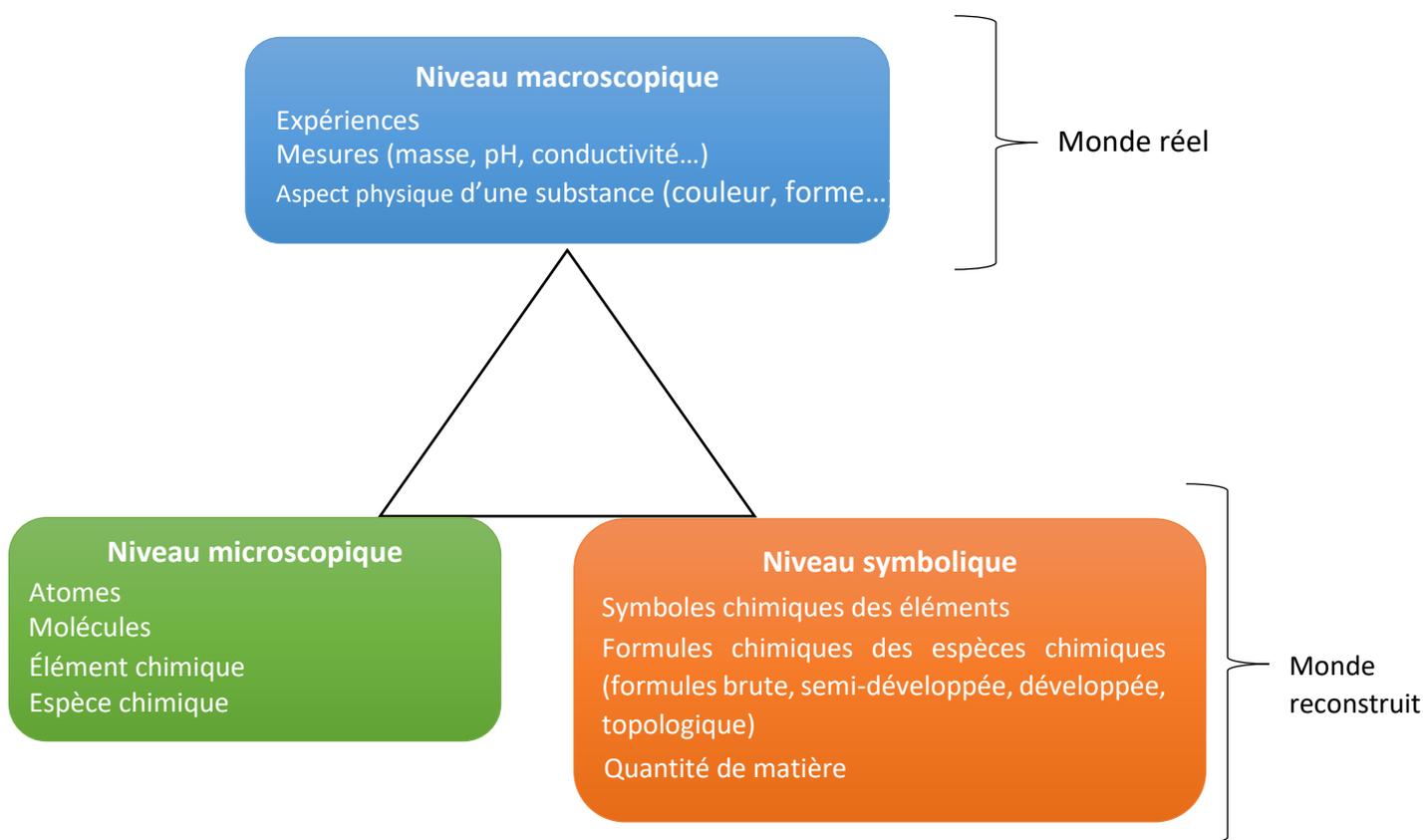


Figure 2 Schéma des niveaux de modélisation en chimie appliqué à l'équation de réaction

## 2) La chimie dans l'enseignement secondaire

### a) La démarche d'enseignement-apprentissage

Au secondaire, l'enseignement des sciences physiques a plusieurs objectifs. Transmettre aux élèves un corpus de connaissances afin de développer leur culture scientifique, mais aussi leur apprendre à raisonner de façon rigoureuse, en suivant les principes de la démarche scientifique. Cette démarche scientifique pouvant être décrite de plusieurs manières, j'en propose ici une version personnelle sous la forme d'un schéma. Il est à noter que cette représentation correspond à la démarche scientifique transposée dans un contexte scolaire. Nous pourrions l'appeler *démarche d'enseignement-apprentissage*.

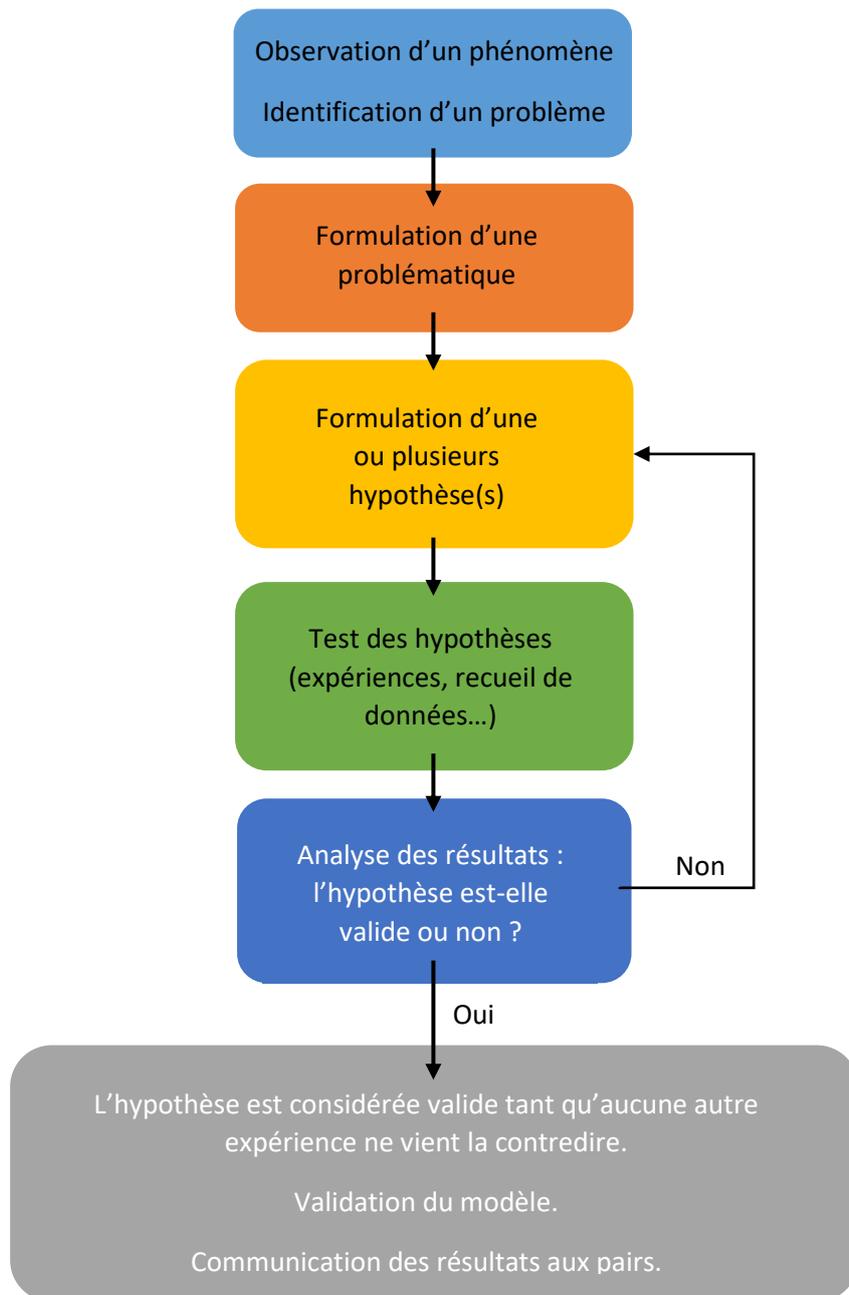


Figure 3 Schéma de la démarche d'enseignement-apprentissage

Cette démarche est le plus souvent employée lors de travaux pratiques ou de résolutions de problème. Concrètement, une situation est présentée aux élèves, puis le professeur construit avec eux une problématique (les modalités de travail dans la classe peuvent être très variées : travail individuel, en groupes ou en classe entière). Des hypothèses sont ensuite établies, puis testées, la plupart du temps avec une expérience. Le mécanisme se conclut par la validation ou la réfutation des hypothèses initiales. Le corpus d'hypothèses obtenu à la fin du travail constitue le savoir acquis par les élèves. La construction d'un modèle se fait donc en suivant cette démarche, par boucles successives, jusqu'à avoir validé un ensemble d'hypothèses. Cette démarche est clairement inspirée de la démarche de modélisation utilisée par les scientifiques que nous avons décrite précédemment.

Il faut cependant distinguer la modélisation du scientifique et celle d'un élève de collège ou de lycée. Le chercheur passe plusieurs années à établir son modèle, et son travail commence par de nombreuses recherches bibliographiques. Il s'appuie sur le travail de ses pairs pour proposer quelque chose de nouveau. La tâche demandée aux élèves n'est bien entendu pas aussi ambitieuse. Elle consiste à utiliser le modèle pour construire des connaissances et pour leur donner du sens. Ainsi, les recherches en didactique montrent qu'il est important d'implémenter des situations de modélisation dans l'apprentissage, situations dans lesquelles les élèves mettent en lien des événements du monde réel et des éléments du monde reconstruit (Bécu-Robinault, 2004 ; Tiberghien, 2017 ; cités par Boivin-Delpieu, 2020).

D'après les Bulletins Officiels, l'appropriation de cette démarche est régulièrement travaillée au lycée à travers 5 compétences :

- S'approprier : comprendre la question posée, problématiser. Cette compétence correspond aux deux premières étapes de la démarche scientifique.
- Raisonner/Analyser : déterminer la marche à suivre pour résoudre le problème, émettre des hypothèses (troisième étape de la démarche).
- Réaliser : résoudre le problème en testant les hypothèses, éventuellement en réalisant des expériences (quatrième étape).
- Valider : analyser les résultats des expériences, déterminer si les hypothèses sont toujours valides ou non (cinquième étape).
- Communiquer : présenter ses résultats de façon claire et ordonnée (sixième étape).

Cependant, Morge et Doly (2013) mettent en garde les enseignants quant à une erreur souvent produite par les élèves lors du travail sur la notion de modèle. En effet, les apprenants pensent parfois que le modèle est une représentation exacte de la réalité, alors que ce n'est pas le cas : le modèle a une visée simplificatrice. Ce problème peut apparaître avec toutes les classes, mais surtout lorsque le professeur lui-même fait cette erreur de compréhension.

Dans leur article de 2013, les auteurs formulent trois conditions didactiques pour éviter cette confusion entre modèle et réalité. Premièrement, « *l'objet modélisé doit être directement perceptible* », du moins lorsque cela est possible. Il reste des situations où cette condition est difficile à remplir, comme pour le modèle de l'atome. Deuxièmement, les auteurs recommandent de donner à l'élève plusieurs modèles se complétant les uns les autres, chaque représentation ne devant être ni trop simple, ni trop complexe. Troisièmement, le modèle ne doit pas être utilisé uniquement pour décrire la réalité, mais également pour faire des prédictions.

Enfin, d'autres élèves font l'erreur opposée et refusent d'abandonner leurs conceptions initiales pour les remplacer par le modèle. Cette situation apparaît le plus souvent avec des modèles très abstraits (Chi et al., 1994, ; Scott, 1992 ; cités par Le Maréchal & Bécu-Robinault, 2006, p1). Cela montre qu'il est important de recueillir les idées préconçues des apprenants au début de l'enseignement pour leur expliquer en quoi elles sont fausses et pour vérifier par la suite qu'elles ne subsistent pas dans leur esprit.

#### *b) L'équation de réaction dans les programmes du secondaire*

L'équation de réaction est donc naturellement présente dans les programmes du secondaire et est largement utilisée du collège au lycée. Au collège, le professeur fait découvrir ce modèle aux élèves. Cette période de l'apprentissage est une étape clé pour bien comprendre la signification de cette écriture particulière. L'enseignant doit redoubler d'efforts pour que tous les aspects de cette symbolique soient acquis, et il doit aussi lutter contre les confusions qui pourraient germer dans les esprits des élèves.

Dans le Bulletin Officiel de cycle 4 de 2020, on trouve associées à la notion d'équation de réaction les connaissances et compétences suivantes :

- *Distinguer transformation chimique et mélange, transformation chimique et transformation physique.*
- *Interpréter une transformation chimique comme une redistribution des atomes.*
- *Utiliser une équation de réaction chimique fournie pour décrire une transformation chimique observée. Notions de molécules, atomes, ions. Conservation de la masse lors d'une transformation chimique.*
- *Interpréter une formule chimique en termes atomiques.*

Il est également demandé d'insister sur la conservation de la matière, qui est traduite par une conservation de la masse. Les textes officiels recommandent d'introduire expérimentalement des transformations chimiques à partir de la classe de 5<sup>e</sup>. Ces transformations sont alors interprétées à l'aide d'un modèle particulière. Les élèves commencent à travailler l'équation de réaction à partir de la 4<sup>e</sup>, et ce savoir est consolidé en 3<sup>e</sup> puis en 2<sup>nd</sup>e. La plupart du temps, des réactions de combustion sont présentées aux élèves.

Équilibrer une équation de réaction est un enjeu majeur du programme de chimie du collège et de 2<sup>nd</sup>e. En 4<sup>e</sup>, les élèves commencent par représenter une équation de réaction à l'aide de modèles moléculaires. La notion de nombre stœchiométrique n'est pas directement présentée : les apprenants représentent plusieurs molécules du même réactif ou produit pour équilibrer l'équation. Cette représentation est alors traduite en équation de réaction, avec des nombres stœchiométriques. Cependant, le terme « stœchiométrique » n'est pas abordé avec les élèves. De la même façon, on parle davantage « d'ajuster » les équations de réactions que « d'équilibrer ». De plus, il n'est plus demandé aux élèves de savoir ajuster une équation de réaction. Ils doivent être en mesure de vérifier si une équation donnée est équilibrée ou non.

L'année de 2<sup>nd</sup>e doit finaliser l'acquisition de l'équation de réaction. Le dénombrement des espèces en quantités de matière a été traité plus tôt dans l'année. Les élèves doivent être capables de l'équilibrer et de l'exploiter pour déterminer le réactif limitant, le programme ne traitant que des réactions totales. La notion d'espèce spectatrice est aussi abordée.

En 1<sup>ère</sup>, le modèle de l'équation de réaction est considéré comme acquis. Il sert alors de base de travail pour introduire le tableau d'avancement, les mélanges stœchiométriques, et les réactions non totales.

Une nouvelle grande famille de réactions est alors présentée : les réactions d'oxydo-réduction. L'apprentissage est approfondi en Terminale, où sont vues les réactions acides-bases, ainsi que le modèle de l'équilibre dynamique.

*c) Les difficultés rencontrées par les élèves face à l'équation de réaction*

Les enseignants du secondaire et même du supérieur constatent chaque année que la maîtrise de l'équation de réaction n'est pas si facile. De nombreux tests ont été effectués et quantité d'articles ont été publiés à ce sujet (Canac, 2020 ; Dehon & Snauwaert, 2015 ; Dumon & Laugier, 2004 ; Fillon, 1997 ; Kermen, 2018 ; Mzoughi-Khadhraoui & Dumon, 2012), ce qui me permet de rassembler ici de façon non exhaustive les difficultés couramment rencontrées par les apprenants, ainsi que leur origine et une remédiation lorsque cela est possible.

- **Confusion entre transformation chimique, transformation physique et mélange.**

La distinction entre ces notions n'est pas évidente pour un public novice, car les apprenants ont l'impression de « faire la même chose » dans les trois cas, comme le montre ces illustrations issues d'un manuel de collègue. Par exemple, faire une transformation chimique nécessite généralement de *mélanger* les réactifs, d'où la confusion des élèves.

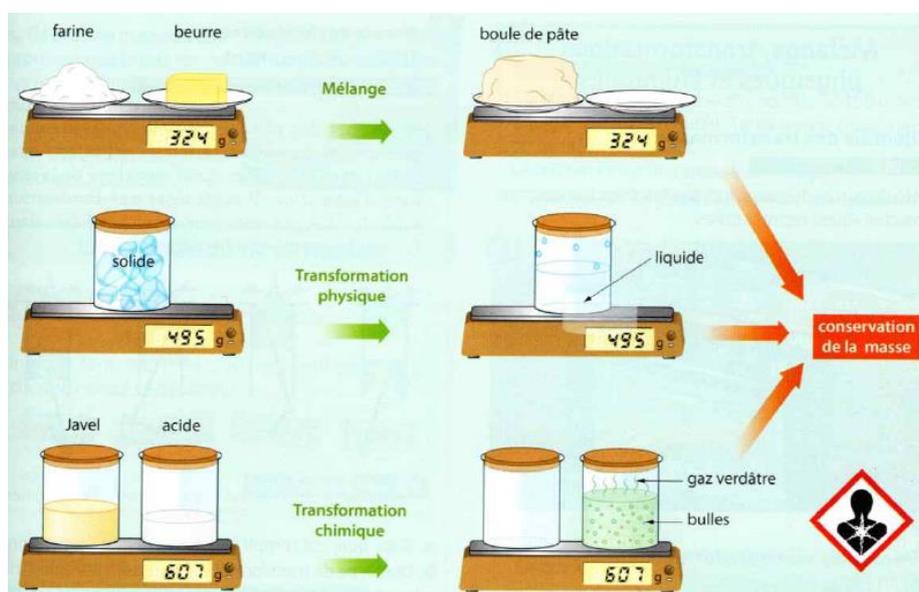


Figure 4 Illustration issue d'un manuel de cycle 4 (Bordas, 2017)

De plus, les transformations physiques et nucléaires peuvent être représentées par des écritures symboliques inspirées de l'équation de réaction, comme le montre le sujet d'exploitation documentaire du CAPES 2021. Cela contribue à renforcer les confusions de la part des élèves, si le professeur ne précise pas ce point.

### QCM

Voici quelques écritures symboliques modélisant certaines transformations :

1 - $p + p \rightarrow {}^2_1\text{H} + e^+ + \nu$	3 - $\text{H}_2\text{O}_{(l)} \rightarrow \text{H}_2\text{O}_{(g)}$	5 - ${}^3_2\text{H} + {}^3_2\text{H} \rightarrow {}^4_2\text{H} + p + p$
2 - ${}^2_1\text{H} + p \rightarrow {}^3_2\text{H} + \gamma$	4 - $\text{CaF}_{2(s)} \rightarrow \text{Ca}^{2+}_{(aq)} + 2 \text{F}^{-}_{(aq)}$	6 - $\text{CH}_4 + 2 \text{O}_2 \rightarrow \text{CO}_2 + 2 \text{H}_2\text{O}$

**Q1.** L'équation 4 modélise une :  
A) fusion  
B) vaporisation  
C) dissolution

**Q2.** L'équation 3 modélise une transformation :  
A) physique  
B) chimique  
C) nucléaire

Figure 5 Extrait de l'Annexe 1 du sujet d'exploitation d'un dossier documentaire du CAPES 2021

Dans tous les cas, les élèves comprennent qu'un changement a lieu, le système passe d'un état initial à un état final. Mais la nature de ce changement n'est pas toujours claire dans leur esprit. Les manuels du secondaire nous apportent une première façon d'éviter cet écueil en définissant clairement chaque type de changement :

- Un mélange est une réunion de différentes substances sans qu'aucune ne disparaisse. On distingue les mélanges homogènes et les mélanges hétérogènes.
- Une transformation physique est le changement d'aspect d'une substance. Il s'agit par exemple d'une dissolution ou d'un changement d'état. Là aussi, la substance ne disparaît pas.
- Une transformation chimique est la transformation d'une ou plusieurs substance(s) appelée(s) réactif(s) en produit(s).

Il est également demandé d'insister sur la conservation de la masse, qui est observée dans chaque cas.

- **Confusion entre transformation chimique et réaction chimique.**

Les différentes expériences réalisées par les chercheurs cités plus haut montrent que les élèves du secondaire ne font pas de différence entre ces deux termes. Dehon et Snauwaert (2015) écrivent que les apprenants contournent cette difficulté en employant des « termes refuges », ce qui explique aussi la confusion entre transformation chimique, transformation physique et mélange. Les auteurs expliquent alors que la meilleure façon pour lutter contre l'amalgame transformation/réaction chimique est de dire clairement dans quel niveau de description se situe chaque terme. La réaction chimique relève du symbolique, alors que la transformation chimique appartient aux domaines macroscopiques et microscopiques. Ainsi, des élèves ne travaillant sur l'équation de réaction que du point de vue symbolique ne la visualisent que comme une combinaison de symboles, vidée de sens chimique. Leur utilisation de cet outil relève alors du traitement mathématique, que je développe au point suivant.

Cette confusion provient aussi du fait que les apprenants ne comprennent pas exactement ce qu'est une transformation chimique. Au cours de leurs tests, les différents chercheurs ont remarqué que peu d'élèves de collège étaient en mesure de redonner la définition inscrite dans les programmes :

réorganisation des atomes. Et à un niveau supérieur, peu de lycéens et étudiants définissent une transformation chimique par des ruptures et formations de liaisons.

- ***Mauvaise compréhension du sens des chiffres, confusion avec l'équation mathématique.***

Un des plus courants, cet obstacle a de multiples origines. En premier lieu, la polysémie des symboles tels que + ou =. Leur usage intensif en mathématiques conduit les élèves à penser que leur sens est le même dans cette discipline et en chimie. Cette confusion expliquerait aussi pourquoi les apprenants voient un mélange là où il est indiqué que deux réactifs sont mis en présence. Pour contourner cette difficulté, il convient d'informer les élèves que tous les symboles ont leur signification propre en chimie. Notons que le signe = a été remplacé par une flèche double  $\rightleftharpoons$  pour éviter cet écueil, mais également pour signifier davantage que la réaction peut se produire dans les deux sens.

De plus, il est demandé aux apprenants d'équilibrer ou d'ajuster les équations, tâche ressemblant à la manipulation d'équations en mathématiques. Les élèves ne voient qu'un exercice mathématique dans l'écriture des réactions chimiques. Ce problème se résout en donnant davantage de sens à l'équation, c'est-à-dire en associant constamment cette représentation symbolique à ses significations aux niveaux microscopique et macroscopique, comme Dehon et Snauwaert (2015) et Fillon (1997) le recommandent.

Ces confusions avec les mathématiques conduisent les apprenants à mal interpréter les nombres stœchiométriques, les indices et les exposants. Le rapprochement avec des procédures trop calculatoires s'observe chez des élèves qui ne donnent pas correctement les termes désignant ces chiffres. Cette difficulté est également en lien avec le point suivant.

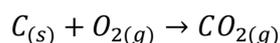
- ***Mauvaise compréhension des formules brutes.***

Enfin, tous les chercheurs remarquent qu'un grand nombre d'élèves ne sait pas lire une formule brute. Par exemple, certains apprenants voient le symbole chimique comme une abréviation du nom de la substance. Dehon et Snauwaert (2015) montrent que cette lecture ne peut pas être correctement effectuée si l'apprenant confond atome et molécule. Et cette confusion explique les erreurs produites quant au sens des indices.

J'ajouterais que la lecture de formules brutes à l'oral est aussi une source de ces erreurs sur les indices. Par exemple, « *La formule brute de l'eau est H 2 O.* » Il n'est pas rare d'entendre des apprenants en déduire que comme le 2 est prononcé avant le O, cela signifie que la molécule comporte un atome d'hydrogène et deux atomes d'oxygène.

De la même façon, de nombreux élèves, jusque dans le supérieur, confondent corps pur et corps simple. La maîtrise de concepts fondamentaux est donc indispensable pour utiliser l'équation de réaction, mais Kermen (2018) explique que cette condition est difficile à remplir pour les élèves. En effet, la chercheuse écrit que la notion de transformation chimique se construit en parallèle de celle de substance, corps pur ou espèce chimique, ces trois termes étant synonymes. Or, la maîtrise du concept d'espèce chimique est nécessaire à la compréhension de l'équation de réaction !

Naturellement, les élèves contournent ces obstacles par divers moyens. Dans leur article, Dumon et Laugier (2004) parlent d'une erreur commise avec la réaction de formation du dioxyde de carbone. Certains élèves voient cette molécule comme un atome de carbone accolé à une molécule de dioxygène. Ils effectuent une « juxtaposition des corps simples ».



Une autre astuce utilisée pour contourner ces problèmes est la recherche d'effets de symétrie par permutation, comme le montre Fillon (1997) avec la réaction entre l'oxyde de cuivre et le carbone. La véritable équation de cette réaction est  $2 CuO_{(s)} + C_{(s)} \rightarrow 2 Cu_{(s)} + CO_{2(g)}$ . Cependant les élèves l'écrivent  $CuO_{(s)} + C_{(s)} \rightarrow CO_{(g)} + Cu_{(s)}$ . La permutation par symétrie est évidente et automatique. Elle se retrouve également dans la traduction à l'oral, en remplaçant l'oxyde de cuivre par le « monoxyde de cuivre » : « monoxyde de cuivre + carbone donne monoxyde de carbone + cuivre ».

Cette difficulté vis-à-vis des formules brutes mène également les apprenants à les visualiser comme immuables. Par exemple, beaucoup ne comprennent pas qu'il est possible d'écrire l'ion hydroxyde de deux façons :  $HO^-$  ou  $OH^-$ . Les élèves n'ont pas d'autre choix que d'apprendre certaines formules par cœur. Cela reste raisonnable au collège, où peu d'espèces chimiques sont rencontrées, mais les sciences physiques ne devraient-elles pas fournir des outils permettant de déduire la plupart des connaissances d'un raisonnement plutôt que d'une mémorisation ? Dumon et Laugier (2004) et Mzoughi-Khadhraoui et Dumon (2012) ont évoqué ce problème, et ont conclu que les élèves devaient néanmoins retenir l'écriture de certaines formules, car leur explication implique la notion de valence qui n'est pas accessible à ce niveau d'enseignement.

- **Synthèse et éléments généraux de remédiation.**

Nous constatons que l'équation de réaction pose de nombreuses difficultés de compréhension aux élèves, la plupart étant liées les unes aux autres. La citation suivante de Fillon offre un résumé adéquat de la situation : « *La réaction chimique est un concept intégrateur difficile qui nécessite de maîtriser simultanément un ensemble de concepts de la chimie.* » Autrement dit, les élèves se heurtent à des obstacles qu'ils ne peuvent pas surmonter car les stratégies des professeurs ne leur permettent pas de le faire.

Quelles postures le professeur doit-il adopter alors pour aider ses élèves ? Un premier réflexe consiste à recueillir davantage les conceptions initiales des apprenants, afin de comprendre l'obstacle auquel l'élève est confronté. Ensuite, Dehon et Snauwaert (2015) recommandent de multiplier les représentations et d'amener plus d'expériences en classe afin de relier davantage l'équation de réaction aux niveaux de description macroscopique et microscopique et pour s'éloigner des manipulations trop procédurales, calculatoires.

Enfin, Mzoughi-Khadhraoui et Dumon (2012) proposent de simplement faire comprendre aux élèves que la chimie a son propre langage en procédant par analogies. Les symboles des éléments chimiques constituent un alphabet, à partir duquel sont construits des mots - les espèces chimiques -, qui peuvent ensuite être ordonnés dans une phrase respectant des règles de grammaire - l'équation de réaction.

### 3) Le numérique dans la classe

#### a) Les TICE

L'utilisation du numérique en classe est un sujet qui occupe une place croissante dans les programmes scolaires et dans les esprits des professeurs. Cet outil est aujourd'hui dénommé par l'acronyme TICE : Technologies de l'Information et de la Communication pour l'Enseignement. Ce terme très vaste regroupe l'ensemble des moyens techniques permettant de produire, traiter et échanger des documents ou données numériques dans la classe.

Nous pouvons séparer ces outils numériques en deux catégories. La première recense les TICE pouvant être utilisés dans n'importe quelle discipline. Ils servent le plus souvent à organiser

l'enseignement, mais ils ont aussi une fonction dans la transmission des connaissances. Leur utilisation dépendant de l'enseignant, il existe autant de façons de les impliquer dans la vie de classe qu'il y a de professeurs.

Cette famille regroupe les ressources en ligne comme des manuels numériques ou des plates-formes d'apprentissage. D'autres exemples permettent l'acquisition de compétences transversales : des objets connectés (ordinateur, tablette numérique, tableau interactif, smartphone), ainsi que des logiciels appartenant à des suites bureautiques (traitement de texte, tableur, logiciel de présentation, outil de dessin).

La seconde catégorie concerne les outils utilisés d'une façon spécifique en physique-chimie pour l'acquisition de connaissances et savoir-faire. Il s'agit des logiciels d'acquisition et de traitement de données, de programmation et de simulation.

Les Bulletins Officiels incitent de plus en plus à employer cet outil avec les élèves, principalement dans des activités de modélisation. Cependant, la place de l'expérimentation « réelle » est toujours très importante. Ainsi, les programmes scolaires comportent des sections « capacités expérimentales » et « capacités numériques ».

#### *b) Les simulations*

- **Définition et critères d'analyse d'une simulation**

Différents auteurs ont travaillé sur l'utilisation des simulations numériques pour enseigner la chimie (Le Maréchal et Bécu-Robinault (2006), Droui et El Hajjami (2014)). D'après ces articles, une simulation est définie comme un programme informatique donnant d'une situation réelle et complexe une représentation simplifiée par laquelle l'apprenant peut agir. L'élève construit alors ses connaissances en observant les conséquences de ses actions dans le logiciel.

Droui et El Hajjami reprennent quatre caractéristiques d'une simulation données par Gredler en 2004 :

- La simulation doit être une représentation adéquate du monde réel complexe, en enlevant toutefois les détails qui peuvent gêner la compréhension ou qui ne sont pas indispensables.
- Elle doit attribuer un rôle à chaque participant. Dans la plupart des cas, il s'agira de mettre l'élève à la place d'un expérimentateur ou d'un chercheur.
- Elle doit contenir un nombre important de données, afin que l'apprenant puisse l'explorer au maximum et tester toutes sortes de stratégies. En effet, cette condition permet à l'apprenant d'émettre un nombre très varié d'hypothèses lors de sa démarche scientifique.
- La simulation doit fournir un retour sur ses actions à l'apprenant. Ses actions dans le logiciel ont des conséquences modifiant la situation en cours, ce qui lui permet d'interpréter les résultats de ses expériences virtuelles.

Ces simulations peuvent se présenter sous des formes très diverses. Je reprendrai les critères d'analyse proposés par Beaufiles et Richoux (2003) sous forme d'un schéma :

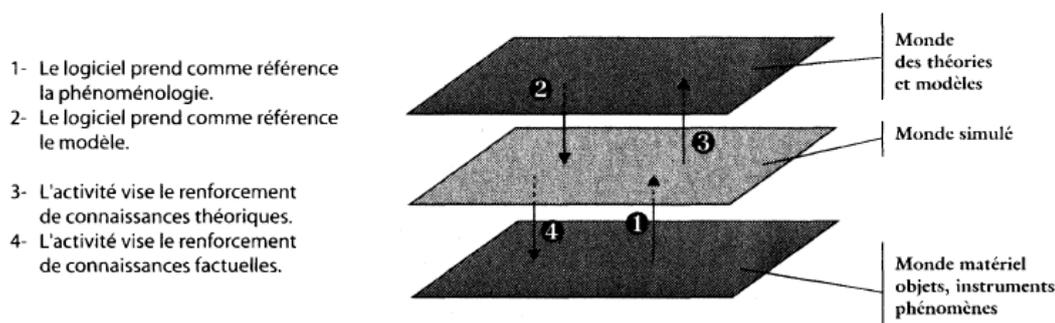


Figure 6 Place de la simulation dans la démarche de modélisation (Beaufiles et Richoux)

D'après ces auteurs, les simulations sont un intermédiaire entre théorie et expérience, ce qui correspond aux mondes « réel » et « reconstruit » de notre triangle des niveaux de description. Le logiciel peut alors s'appuyer sur un de ces deux mondes (cas (1) et (2)), dans le but de développer les connaissances de l'apprenant sur l'un ou l'autre de ces mondes (cas (3) et (4)).

Le cas (1), « le logiciel prend comme référence la phénoménologie », correspond à des **simulations empiriques**, où il est demandé à l'apprenant de réaliser des mesures en utilisant une instrumentation virtuelle. Il s'agit par exemple des simulateurs de montage de chimie ou de titrage. Le cas (2), « le logiciel prend comme référence le modèle », représente les **simulations symboliques**, qui sont utilisées pour tester un modèle. Ce sont des simulations où l'apprenant manipule le modèle, comme des logiciels sur le modèle de l'atome ou du gaz parfait.

Avant d'utiliser une simulation, il faut donc savoir quels niveaux celle-ci met en connexion, et dans notre cas nous devons détailler entre niveau microscopique et niveau symbolique dans le monde reconstruit. En outre, Beaufiles et Richoux proposent une liste de questions permettant une analyse plus fine de la simulation :

- Le modèle est-il explicité ?
- Quels sont (nombre et nature) les degrés de liberté du modèle, c'est-à-dire les paramètres donnés à manipuler ?
- Quels sont les différents registres sémiotiques mis en jeu ?
- Quels sont les modes d'action sur le modèle (numérique, formel, graphique) ?
- Les informations relatives aux calculs effectués par le logiciel sont-elles données ?
- Les niveaux de description sont-ils clairement distingués ?

- **Avantages et inconvénients des simulations, erreurs à éviter**

Ces simulations présentent de multiples avantages, comme donner virtuellement accès à des expériences trop dangereuses pour être réalisées en classe ou relevant de l'impossible. Par exemple, plusieurs simulations sur le site web de l'université du Colorado incluent un appareil fictif donnant immédiatement la concentration d'une solution, sans avoir recours à un dosage. Cet élément permet alors de contourner les problèmes supplémentaires que rencontrent les élèves (comprendre le principe d'un dosage par étalonnage ou par titrage) lorsqu'ils souhaitent comprendre la notion de concentration. La simplification du système étudié est un des principaux avantages des simulations. Les détails superflus et les problèmes purement pratiques sont retirés, permettant à l'élève de concentrer toute son attention sur le sujet à étudier.

Le second atout majeur des simulations est la richesse des paramètres qui peuvent être ajustés pour étudier un phénomène. Bien entendu, il faut en général éviter de travailler avec tous les paramètres en même temps pour ne pas perdre la simplification de l'expérience qui a été gagnée en passant au format numérique. Cependant cette diversité de fonctions permet d'explorer le sujet en détail et d'en multiplier les représentations, ce qui est bénéfique pour l'apprentissage.

Néanmoins, il existe des écueils dans lesquels les enseignants doivent éviter de tomber, comme l'affirment Droui et El Hajjami (2014) ainsi que Tricot et Amadiou (2014). La première erreur de certains apprenants travaillant avec une simulation est de confondre le phénomène réel et sa représentation dans le logiciel. Ils pensent alors que l'image donnée par le programme est une représentation exacte de la réalité. Par exemple, un élève pourrait penser qu'une molécule d'eau est réellement constituée de deux sphères blanches reliées à une sphère rouge par deux bâtonnets blancs. Commettre cette erreur revient en fait à confondre modèle et réalité, comme nous en avons parlé précédemment.

Évidemment, la solution à ce problème ne consiste pas à intégrer la réalité pure dans une simulation, car cela serait impossible (la molécule d'eau reste décrite à l'aide de modèles, aussi poussés soient-ils), et car cela reviendrait à perdre la qualité simplificatrice du logiciel. Corriger cette erreur nécessite plutôt un rappel constant de la part du professeur que tout ce qui est présenté à l'écran n'est qu'une façon de représenter la réalité (comme dans le tableau *La Trahison des images* de René Magritte), ce rappel étant au passage fait dès que la notion de modèle est abordée avec les élèves.

Enfin, le risque principal des simulations souligné par ces différents auteurs est la tentation de substituer le cours ou la totalité des expériences par ces logiciels. En 2014, Franck Amadiou et André Tricot écrivent dans leur ouvrage, *Apprendre avec le numérique*, que la technologie n'est pas un dispositif d'apprentissage en soi, mais un outil parmi d'autres, dont l'utilisation n'est pertinente que pour certaines tâches, à certains moments de l'apprentissage. Dans leur article, Droui et El Hajjami ajoutent que ces simulations ont le plus d'effets positifs lors de situations d'apprentissages par problèmes.

### III) Question de recherche

À la suite de ces remarques sur l'utilisation du numérique en classe, nous constatons que les TICE présentent deux aspects. D'un côté, ils semblent ouvrir un espace de liberté pédagogique dans lequel tout professeur rêve de voir la clé pour aider les élèves à mieux comprendre les notions les plus difficiles. De l'autre, de nombreuses mises en garde précèdent l'utilisation de cet outil. Il est notamment toujours rappelé de conserver des expériences « réelles ».

Plusieurs recherches ont été réalisées dans ce domaine, et toutes n'aboutissent pas à la même conclusion. Les travaux en physique de Boivin-Delpieu (2020) et Bécu-Robinault (1997) montrent que les objets tangibles sont plus efficaces que les simulations pour modéliser les mouvements de la Terre ou le concept de puissance. Mais la même auteure, Bécu-Robinault, montre avec Le Maréchal (2006) que ces simulations sont efficaces en chimie à travers le projet Microméga, tout comme Droui et El Hajjami (2014).

La thématique de ce mémoire serait donc une nouvelle étude de cas de comparaison entre objets tangibles et simulations lors d'une activité de modélisation en chimie. Je reprendrai le triangle des niveaux de description inspiré du triangle de Johnstone (1993) pour mon travail et je ferai l'hypothèse que l'élève a acquis des connaissances lorsqu'il parvient à mettre en relation ces différents niveaux.

Mes objectifs seront de déterminer si les élèves parviennent à comprendre l'équation de réaction avec des objets tangibles, puis avec une simulation. Je comparerai ensuite l'avancée des savoirs dans les deux cas afin de répondre à la question suivante : une simulation peut-elle aider à modéliser l'équation de réaction ?

#### IV) Méthodologie

Pour comparer les effets d'une simulation et d'objets tangibles pour construire le modèle de l'équation de réaction, il convient d'étudier deux groupes d'élèves, le premier groupe travaillant avec les objets tangibles, et le second avec une simulation.

##### 1) Présentation de la simulation

Le titre de la simulation retenue est *Équilibrer les équations-bilans*. Elle est disponible au téléchargement sur le site web [pccl.fr](http://pccl.fr) (PCCL signifiant Physique Chimie Collège Lycée). Dans cette simulation, trois équations de réaction sont successivement données à équilibrer : la combustion du carbone, la combustion du méthane et la combustion du butane.

Chaque équation de réaction est dépeinte de trois façons différentes, chaque représentation correspondant à un niveau de description du triangle de Johnstone. La première représentation est une phrase décrivant la réaction au niveau macroscopique. Par exemple : « *Le carbone réagit avec le dioxygène pour donner du dioxyde de carbone* ». Le niveau microscopique est représenté par des modèles compacts de molécules qui tournent sur elles-mêmes. Enfin, le niveau symbolique apparaît avec les formules brutes des espèces chimiques (voir figure 8).

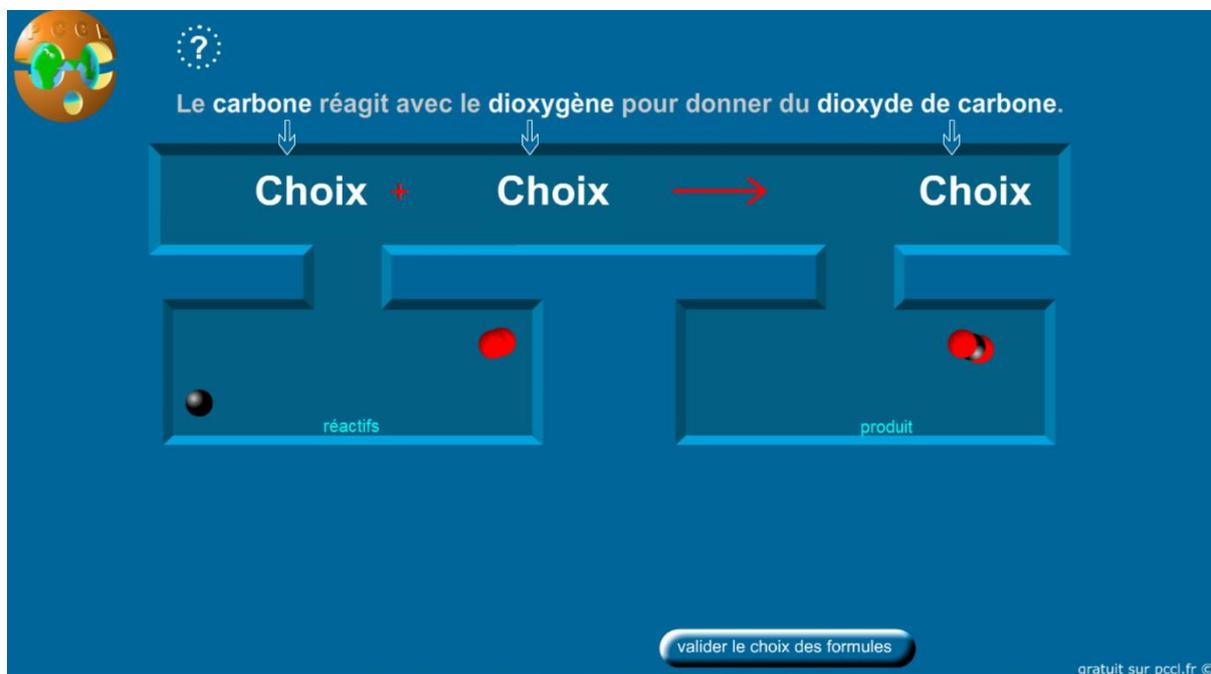


Figure 7 Capture d'écran de la simulation *Équilibrer les équation-bilans* ([pccl.fr](http://pccl.fr))

Ce logiciel montre clairement que l'équation de réaction est un modèle reliant ces différents niveaux de description. Par exemple, des flèches relient les noms des espèces chimiques dans la phrase à leur position dans l'équation de réaction, puis à leur formule brute. Ou encore, des cases positionnent les molécules du côté « réactifs » ou « produits » de l'équation de réaction.

Dans cette simulation, deux tâches sont demandées à l'apprenant. Comme nous pouvons le voir sur la figure 7, la première est de choisir la formule brute de chaque espèce chimique, en s'aidant de son nom et de son modèle moléculaire. L'apprenant doit ensuite valider sa proposition. Si elle est juste, la simulation passe à la seconde étape. Si elle est fautive, le logiciel indique qu'il y a une erreur et reste à la première étape jusqu'à ce que la bonne réponse soit trouvée.

Pour la seconde tâche (voir figure 8), l'apprenant doit équilibrer l'équation de réaction en modifiant les valeurs des nombres stoechiométriques. Nous pouvons remarquer sur la figure 8 que la phrase décrivant la réaction au niveau macroscopique disparaît à la deuxième étape, ce qui constitue un point critiquable de cette simulation.

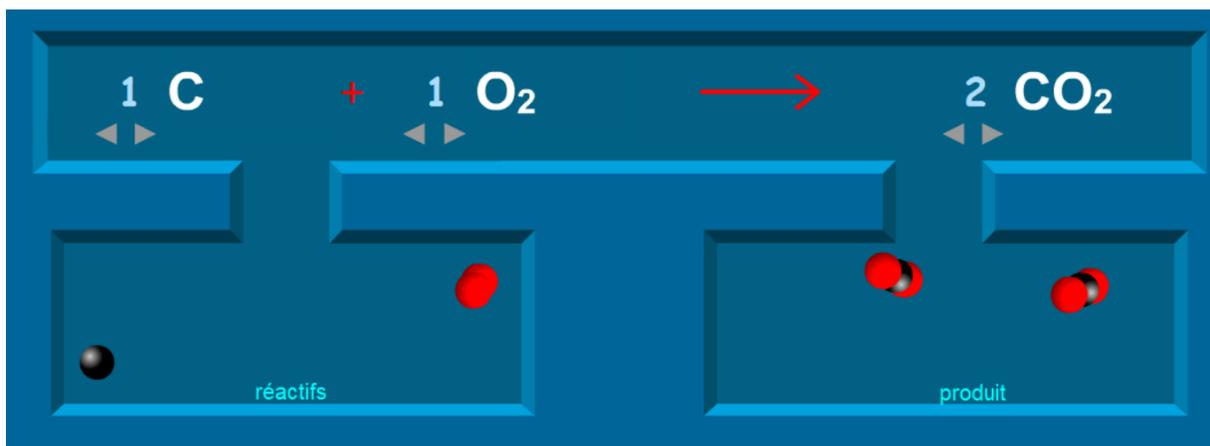


Figure 8 Capture d'écran de la simulation Équilibrer les équation-bilans (pocl.fr)

Comme pour la première étape, l'apprenant doit valider sa réponse, et le logiciel indique si elle est juste ou fautive. Seule une bonne réponse permet de passer à l'équation suivante. Il est important de demander à l'élève de valider ses réponses et de le maintenir face au problème non résolu ; afin d'éviter que l'apprenant réussisse par hasard, et pour le pousser à se questionner, à réfléchir et éventuellement à avancer par essai-erreur.

Nous pouvons analyser cette simulation à l'aide des critères établis dans les cadres théoriques. D'après Beaufils et Richoux (2003), nous sommes dans le cas où le logiciel prend comme référence le modèle pour développer les connaissances théoriques (cas (2) et (3)). Il s'agit donc d'une **simulation symbolique**.

D'après la description que nous avons réalisée au point précédent, nous pouvons dire que le modèle de l'équation de réaction est clairement explicité dans cette simulation, et que les trois niveaux de description sont bien distingués. À première vue, deux degrés de liberté sont présents : les formules brutes des espèces chimiques et les nombres stoechiométriques. Cependant, ces deux paramètres ne sont pas modifiables simultanément, mais successivement. De plus, on ne peut pas réellement parler de « degré de liberté » pour les formules brutes. Il s'agit plutôt d'un exercice préliminaire, permettant d'accéder à la manipulation des nombres stoechiométriques. Nous considérerons donc qu'il n'y a en réalité qu'un seul degré de liberté : les valeurs des nombres stoechiométriques. Le mode d'action sur le modèle se fait donc dans le registre numérique. Cela montre que l'objectif premier de cette simulation est d'apprendre à équilibrer des équations de réaction.

Plusieurs registres sémiotiques sont présents : phrase, modèles moléculaires, schéma (les cases séparant les réactifs et les produits), et bien sûr, équation de réaction. De façon générale, la multiplication des registres sémiotiques est une bonne chose, car cela offre à l'apprenant plusieurs

formes d'encodages, ce qui lui permet une meilleure compréhension et une mémorisation plus durable.

Les informations relatives aux calculs effectués par le logiciel ne sont pas données, mais on devine que les opérations réalisées sont très simples. Pour le choix des formules, la simulation vérifie simplement que les formules sélectionnées correspondent aux solutions. Le fonctionnement est certainement le même pour les nombres stœchiométriques, mais il est possible que le logiciel calcule le nombre d'atomes dans les réactifs et les produits (pour chaque type d'atomes) et vérifie que le même nombre est obtenu de chaque côté.

## 2) Protocole expérimental

Pour ce mémoire de recherche, je rends compte du travail réalisé avec deux classes de quatrième issues d'un même collège. Les deux groupes ont suivi le même enseignement, avec la même professeure. La seule différence entre les deux classes est le type de l'activité de découverte proposée sur l'équation de réaction : avec des objets tangibles pour les uns, avec la simulation PCCL pour les autres. L'expérimentation s'est déroulée en quatre temps, séparés chacun d'une semaine :

- a) Test préliminaire.
- b) Activité de découverte.
- c) Séance d'institutionnalisation.
- d) Test final.

### a) Test préliminaire

Des prérequis sur les notions d'atome et de molécule sont nécessaires pour que les élèves soient en mesure de participer à l'activité de découverte. En amont, l'enseignante a traité cette partie du programme, en commençant par la notion d'élément chimique. Comme les ions ne sont pas vus en quatrième, le tableau périodique a été présenté comme la liste des symboles des éléments connus. L'atome a été défini comme un constituant microscopique de la matière ; l'étude de sa structure interne étant réservée à la classe de troisième. Les élèves ont donc appris à associer un symbole chimique et une représentation schématique à différents atomes. Parmi les atomes que les élèves doivent connaître, nous pouvons citer le carbone, l'oxygène, l'azote, l'hydrogène et le chlore.

Nom de l'atome	Symbole	Représentation
Carbone	C	
Hydrogène	H	
Oxygène	O	
Azote	N	

► Atomes courants

Figure 9 : Tableau issu d'un manuel de cycle 4 (Bordas, 2017)

Une molécule a ensuite été définie comme un assemblage d'atomes. De la même façon que pour les atomes, les élèves ont appris à associer un modèle moléculaire et une formule brute à différentes

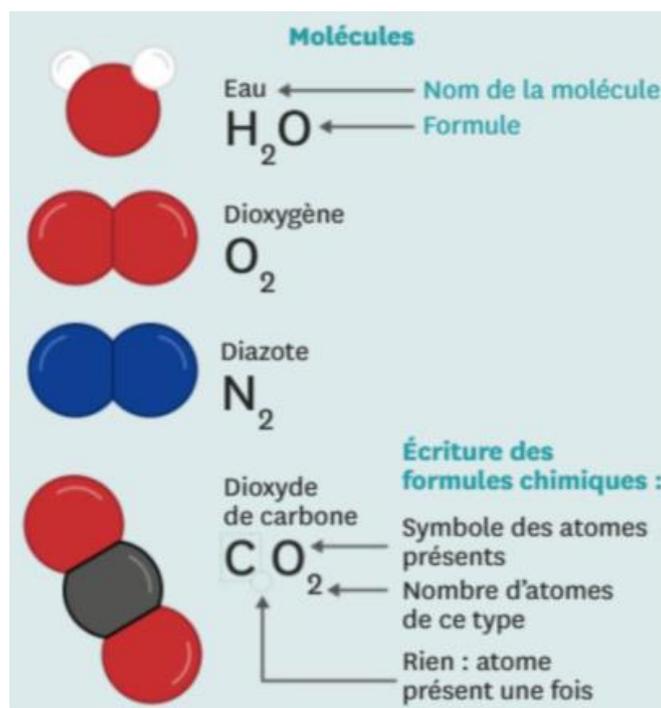


Figure 10 : Illustration issue d'un manuel de cycle 4 (Lelivrescolaire.fr)

molécules. Ils ont également appris à lire une formule brute et à en tirer des informations, dont les différents atomes constituant la molécule ainsi que leur nombre, à l'aide des chiffres en indice. Les élèves doivent connaître les formules brutes et les modèles moléculaires de quelques molécules usuelles, dont le dioxygène, le dioxyde de carbone, le méthane, le dihydrogène, le diazote et l'eau.

Un test préliminaire est donc nécessaire pour vérifier l'acquisition de ces prérequis. Les résultats de ce test permettront également d'affiner l'analyse du travail des élèves lors de l'activité de découverte. Par exemple, si un élève n'a visiblement pas compris le modèle de l'équation de réaction, je pourrai déterminer s'il a rencontré un problème lors de l'activité, ou si ce sont des lacunes qui ne lui ont pas permis de progresser.

Le sujet de ce premier test est disponible en annexe (Questionnaire n°1). Les questions 1 et 2 permettent de vérifier que les élèves savent associer un nom, une représentation schématisée et un symbole ou une formule brute pour les atomes et les molécules usuelles. Ces questions vérifient aussi que les apprenants connaissent la différence entre un atome et une molécule. Les questions 3 et 4 permettent d'observer si les élèves savent lire et exploiter une formule brute.

#### b) *Activité de découverte*

L'activité de découverte a lieu une semaine après ce premier test. Les documents élèves pour les deux types d'activité sont répertoriés en annexe. Pour comparer au mieux les deux séances, nous avons veillé à proposer des activités les plus similaires possibles, afin que la seule différence entre les deux soit le support pédagogique (les modèles moléculaires ou la simulation). Le choix des réactions chimiques a donc été imposé par le logiciel. Les élèves travailleront sur trois réactions de combustion : la combustion du carbone, la combustion du méthane et la combustion du butane.

Dans chaque classe, les élèves sont répartis par binômes ou par trinômes. Il n'est pas nécessaire que tous aient traité intégralement les trois combustions lors de la séance. Proposer trois réactions successives permet d'adapter le contenu au rythme de travail de chaque équipe.

- **Activité de découverte avec la simulation**

L'activité avec la simulation a lieu en salle informatique. Chaque groupe de deux ou trois élèves se partage un ordinateur. Le déroulé de l'activité étant imposé par le logiciel, il faut s'assurer que chaque groupe rendra une trace écrite qui servira à analyser le travail produit. Les enseignantes présentes lors de la séance donnent donc comme consigne de suivre à la lettre les étapes indiquées sur le document élèves. Pour s'assurer de la compréhension de ce document, une première lecture peut être réalisée à voix haute par un élève.

Les étapes à suivre sont identiques pour les trois réactions chimiques proposées. Une à une, les réactions sont présentées aux élèves dans le logiciel (voir figure 7). La phrase affichée à l'écran est également présente dans le document élèves. Après avoir pris connaissance de ces informations, les élèves doivent sélectionner les formules brutes des espèces chimiques, en s'aidant de leur nom et de leur modèle moléculaire. Il leur est alors demandé de recopier leur choix avant validation dans le tableau du document papier (question 1). Il est explicitement demandé de ne pas valider afin d'observer si une erreur est commise. La question 2 sert alors à corriger ces éventuelles erreurs.

Suite à cette première tâche, un encadré vert explique succinctement la conservation des atomes aux apprenants. Il est attendu que les élèves utilisent cette aide pour les questions 3 à 6. Cependant, des explications supplémentaires peuvent être fournies par la professeure si cela s'avère nécessaire.

Après validation des formules brutes, le logiciel affiche directement des nombres stoechiométriques égaux à 1 pour chaque espèce chimique. Avant de demander aux élèves de modifier ces nombres, il convient de leur demander s'il est nécessaire de les modifier. Les apprenants doivent alors indiquer à la question 3 si l'équation affichée à l'écran leur semble équilibrée ou non. S'ils jugent utile de modifier un ou plusieurs nombres, ils doivent l'indiquer à la question 4. Ils peuvent valider leur proposition après avoir écrit la réponse à la question 4. En cas d'erreur, il leur est demandé d'écrire une nouvelle proposition à la question 4 (sans effacer la réponse précédente). Ainsi, chaque équipe pourra réaliser autant de tentatives que nécessaire, avant d'écrire la correction dans les questions 5 et 6.

- **Activité de découverte avec les objets tangibles**

Pour obtenir une activité la plus fidèle possible à celle réalisée en salle informatique, nous avons choisi de distribuer à chaque équipe 3 feuilles au format A3 en plus des documents élèves. Chaque feuille grand format correspond à une réaction chimique (combustion du carbone pour la première,

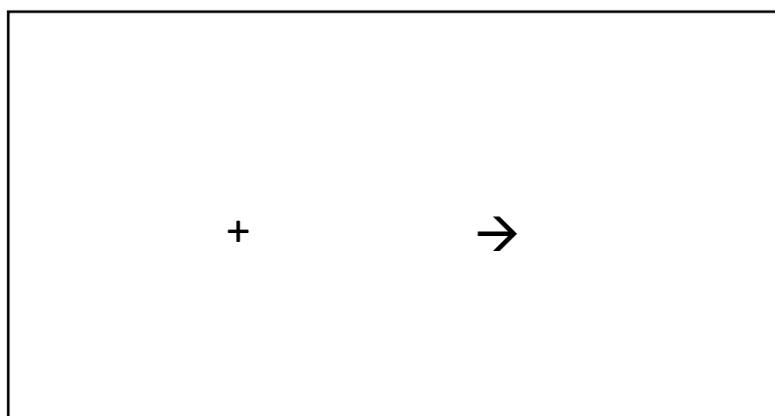


Figure 11 : Exemple de feuille A3 distribuée pour la combustion du carbone

combustion du méthane pour la deuxième, combustion du butane pour la troisième). Des symboles + et  $\rightarrow$  ont été préalablement imprimés sur ces feuilles (voir figure 11).

Pour présenter une activité similaire à la simulation, des modèles moléculaires en plastique sont déposés au-dessus des espaces libres sur la feuille A3 (voir figure 12). Ici, contrairement à ce qui est proposé habituellement par les enseignants du secondaire, il est demandé aux élèves de ne pas déconstruire les modèles en plastique. En effet, les professeurs font construire et déconstruire les modèles moléculaires afin que les apprenants comprennent qu'une transformation chimique est une redistribution des atomes, et afin d'observer directement la conservation des atomes. Or, cette manipulation n'est pas possible dans la simulation PCCL. Il est donc obligatoire de garder des modèles moléculaires préconstruits que les élèves peuvent seulement observer, tout en étant conscient que le potentiel didactique des objets tangibles n'est pas pleinement exploité.

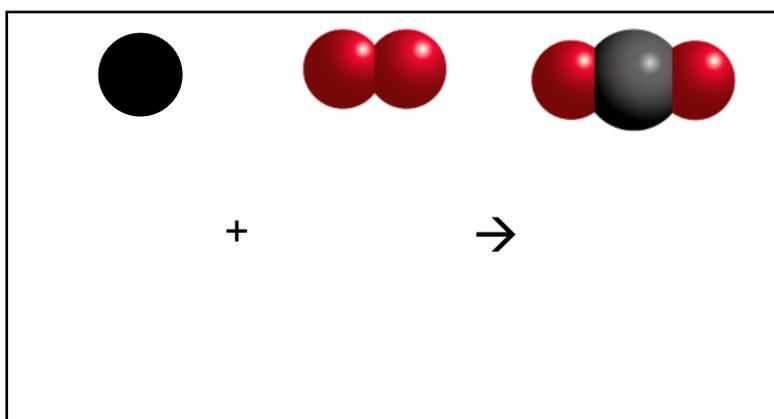
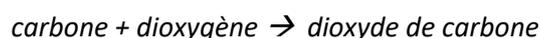


Figure 12 : Feuille A3 avec les modèles moléculaires pour l'étude de la combustion du carbone (schéma en vue du dessus)

Comme dans la simulation, chaque réaction est présentée aux élèves avec une phrase sur leur document personnel. Par exemple, « La combustion du carbone est une réaction entre le carbone et le dioxygène de l'air formant du dioxyde de carbone. » Cette phrase est accompagnée d'une proto-équation, qui leur permet de trouver la place de chaque espèce chimique sur la feuille grand format :



La première question demande aux élèves d'indiquer les formules brutes des espèces chimiques, en les écrivant au crayon de papier sur la feuille A3, dans leurs emplacements respectifs.

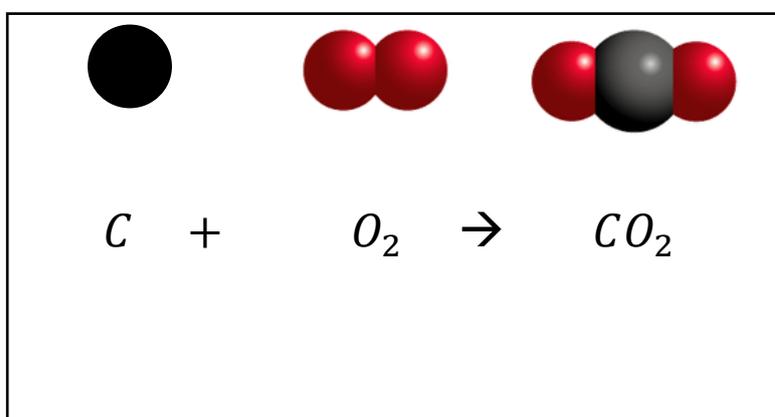


Figure 13 : Réponse attendue par les élèves à la première question

Dans le logiciel, une validation est demandée suite à cette première tâche. Pour cette activité, les élèves doivent donc appeler la professeure pour obtenir cette validation. La professeure pourra alors noter si des erreurs ont été commises.

Lorsque la bonne réponse est donnée par une équipe, la professeure ajoute au crayon de papier un nombre stœchiométrique égal à 1 devant chaque espèce chimique.

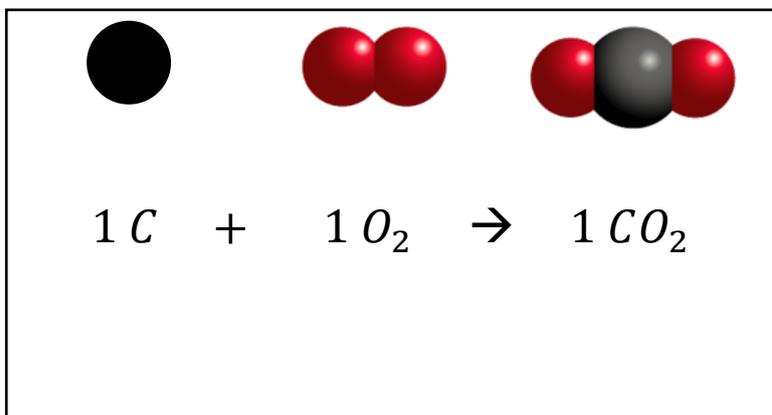


Figure 14 : Feuille A3 de la combustion du carbone après que la professeure ait ajouté les nombres stœchiométriques

Les élèves lisent ensuite l'encadré vert sur leur document personnel. Cet encadré, identique à celui présent dans l'activité en salle informatique, explique la conservation des atomes. Là aussi, une aide supplémentaire peut être apportée par la professeure en cas de besoin.

Les questions 2 à 4 permettent ensuite d'équilibrer l'équation de réaction, comme dans le logiciel. Les élèves doivent indiquer à la question 2 si l'équation avec les nombres initialement proposés par la professeure est équilibrée. Les éventuelles modifications à réaliser sont indiquées à la question 3. S'il y a suffisamment de modèles en plastique disponibles, les élèves peuvent ajouter ces modèles sur leur feuille A3, pour mieux dénombrer les atomes présents. Lorsque les élèves pensent avoir équilibré leur équation de réaction, ils doivent appeler la professeure pour vérification. Si les nombres proposés sont faux, l'enseignante indique qu'il y a une erreur et demande aux élèves de la corriger avant de l'appeler à nouveau. Si tout est juste, les élèves passent à la réaction suivante.

### c) Séance d'institutionnalisation et test final

Une semaine après l'activité de découverte, les élèves reviennent en classe pour assister à une séance classique, où l'enseignante leur fournit la leçon sur l'équation de réaction. Ils peuvent également effectuer quelques exercices d'application.

Enfin, la semaine suivante, les élèves répondent au dernier questionnaire qui permettra d'accéder aux dernières données pour comparer les deux activités (voir le questionnaire n°2 en annexe). Ce test vérifie que les élèves ont globalement compris comment lire et équilibrer une équation de réaction. Il leur est demandé d'identifier les réactifs et les produits sur une première équation. Les autres questions testent leurs connaissances sur la notion de nombre stœchiométrique.

## V) Résultats

Les deux classes de 4e avec lesquelles j'ai travaillées étaient constituées de 23 élèves. Cependant, quelques élèves ont été absents à une ou plusieurs séances. Au final, le nombre d'élèves n'ayant manqué aucun des quatre temps d'expérimentation est de 18 dans chaque classe.

Les moyennes du deuxième trimestre en physique-chimie des deux classes sont assez peu différentes (12,0/20 pour le groupe des objets tangibles ; 12,8/20 pour le groupe de la simulation). Ce premier indicateur donne à penser que les participants des deux groupes sont d'un niveau équivalent.

Les deux activités de découverte ne se sont pas déroulées le même jour, mais elles ont presque eu lieu sur le même créneau horaire. L'activité avec la simulation a été réalisée en premier le lundi 10 janvier, entre 9h20 et 11h25, avec une pause de 15min à 10h15 pour la récréation. La séance avec les objets tangibles a été menée une semaine plus tard, le lundi 17 janvier, entre 8h20 et 10h15, sans pause.

Ensuite, les élèves des deux classes ont répondu au deuxième questionnaire deux semaines après leur activité de découverte. Ces détails pratiques sur l'organisation des séances nous indiquent que les participants des deux groupes ont été placés dans des conditions semblables en ce qui concerne le moment et la durée de réalisation d'une tâche.

D'un autre côté, l'activité avec la simulation a été plus rapide que celle avec les objets tangibles. Pour pallier les différences de rythme entre les élèves, d'autres exercices sur ordinateur leur ont été fournis. En fin de séance, ce groupe était donc globalement plus entraîné que la classe qui a travaillé avec les objets tangibles (ces élèves n'ayant traité que trois équations de réaction). Cette différence dans le déroulement des activités viendra donc nuancer les résultats.

Enfin, les apprenants étaient répartis en équipes lors des deux activités de découverte. Avec la simulation, la plupart des élèves étaient en binômes, à l'exception d'une élève qui a travaillé seule. Lors de la séance avec les objets tangibles, les participants étaient répartis par groupes de trois ou quatre. Cet élément constitue donc une différence de conditions de travail entre les deux groupes.

### 1) Premières impressions en séance

Lors des activités de découverte, j'ai remarqué que plusieurs élèves se sont trouvés confrontés aux difficultés classiques que j'ai présentées auparavant (voir page 13). Par exemple, une élève pensait que les écritures  $H_2O$  et  $H_2 + O$  étaient équivalentes, donc qu'une molécule d'eau n'était rien d'autre qu'un atome d'oxygène superposé à une molécule de dihydrogène.

Autre exemple, lors de l'activité avec les objets tangibles, une autre élève a déclaré que « *les réactifs se mélangent pour donner les produits* ». Elle semble avoir compris que les atomes des réactifs sont réorganisés (ou redistribués) lors de la réaction chimique pour former les produits. Cependant, le terme « mélange » est problématique, car cela donne à penser qu'elle ne voit pas de différence entre une transformation chimique et un mélange.

Un problème lié au symbole  $\rightarrow$  a également été observé. En effet, plusieurs apprenants ont tenté de le remplacer par un symbole = sur leur fiche-réponse. Cette réaction montre que ces élèves ont perçu l'équation de réaction comme une équation mathématique. Ils ont bien compris la conservation des

atomes (ce qu'ils cherchent à représenter avec ce signe =), mais ils ont oublié la notion de transformation.

6) Recopiez ici l'équation de réaction équilibrée.

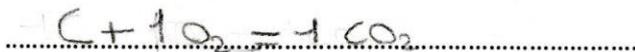


Figure 15 : Extrait d'une fiche-réponse (activité de découverte avec la simulation)

Enfin, la confusion entre atome et molécule a largement été observée, comme dans le dialogue suivant :

Un élève, désignant une molécule de dioxyde de carbone : *Un atome de carbone réagit avec une molécule de dioxygène pour donner un atome de  $CO_2$ .*

La professeure, montrant la molécule : *Un atome ?*

L'élève : *Euh non, une molécule.*

Dans certains cas, cette erreur peut relever de l'inattention. Mais il est probable que la distinction entre atome et molécule ne soit pas claire pour plusieurs élèves.

Les exemples que je viens de présenter proviennent presque tous de l'activité de découverte avec les objets tangibles. J'ai beaucoup plus échangé avec les élèves lors de cette séance que lors de l'activité avec la simulation. En effet, le travail sur ordinateur a rendu les élèves bien plus autonomes, et ils ne levaient la main que pour demander la suite de l'énoncé.

La simulation semble restreindre les pistes d'exploration pour les élèves (ce qui est paradoxal, étant donné que les simulations ont été créées dans ce but !). Par exemple, les boutons permettant d'ajuster les nombres stœchiométriques indiquent immédiatement le paramètre à modifier pour équilibrer l'équation de réaction. Cet élément d'affichage n'est pas présent avec les objets tangibles, et les élèves ont pu se montrer plus créatifs et proposer d'autres solutions pour équilibrer l'équation de réaction : ajouter des atomes, ajouter des molécules...

L'activité avec les objets tangibles a offert plus de points de mesure du niveau de compréhension des apprenants, et a laissé plus d'espace pour l'échange entre élève et professeur. Nous demandions notamment aux élèves de reformuler oralement les informations transmises par l'équation de réaction, ce qui n'a pas été fait dans l'activité avec la simulation. J'ai également perçu une différence de progrès en fin de séance, lors de la conclusion des activités. Avec les objets tangibles, les élèves parlaient volontiers de la conservation des atomes. Avec la simulation, nous avons simplement conclu sur des aspects qualitatifs (les réactifs, les produits, la modélisation d'une transformation chimique). Il est donc tentant de faire un pronostic en faveur des objets tangibles quant à la conclusion de cette étude de cas.

Pour résumer, les activités de découverte ne se sont pas déroulées de la même façon dans les deux groupes. En salle informatique, la simulation a rendu les élèves plus autonomes et efficaces, mais a laissé peu de place à la créativité. Les objets tangibles ont produit l'effet inverse, en permettant aux élèves de proposer plusieurs solutions au problème, tout en offrant plus d'opportunités de dialogue avec la professeure. Cependant, seules trois équations de réaction ont été traitées par les apprenants lors de cette séance.

## 2) Résultats du test préliminaire

### a) Pourcentages de réussite moyens

Un pourcentage de réussite peut être calculé pour chaque élève, pour le test préliminaire comme pour le test final. Le test préliminaire demande aux élèves de fournir 18 réponses, qui peuvent être traitées de façon binaire : correct ou incorrect (les questions posées ne permettent pas de fournir de réponse dans l'entre-deux). Chaque réponse vaut 1 point, ce qui permet d'attribuer une note sur 18 à chaque élève, puis de la ramener sur 100. Les erreurs sur la géométrie des molécules ne sont pas comptées, cette géométrie n'ayant pas d'impact direct sur la compréhension des formules brutes ou de l'équation de réaction.

Une moyenne des pourcentages de réussite peut ensuite être calculée pour chaque classe. Pour comparer objectivement les moyennes des deux groupes, il convient de prendre en compte uniquement les 18 élèves de chaque classe qui ont suivi l'intégralité des quatre étapes du protocole. Le pourcentage de réussite moyen est alors de 73% pour le groupe associé à la simulation. Cette moyenne s'élève à 80% dans le groupe associé aux objets tangibles. Ce test préliminaire confirme donc que les deux groupes étudiés sont environ du même niveau.

### b) Détails des questions

Les résultats obtenus avec ce premier test peuvent être analysés en profondeur afin de comprendre les difficultés rencontrées par les élèves. À nouveau, un pourcentage de réussite peut être calculé, non pas pour chaque élève, mais pour chaque question. Dans ce cas, les élèves n'ayant pas suivi l'intégralité du protocole ne sont pas mis de côté, dans le but de rassembler le maximum de données disponibles. Le nombre d'élèves ayant répondu au test préliminaire est donc de 23 dans le groupe des objets tangibles. Ce nombre est de 22 dans la classe associée à la simulation.

La réponse à une question est considérée comme correcte si elle ne comporte absolument aucune erreur. Sur l'énoncé du test préliminaire, les questions 1 et 2 sont des tableaux comportant plusieurs cases à compléter, accompagnés d'une question. Une réponse juste à la question 1 ou 2 signifie donc que l'ensemble du tableau a été correctement complété, et que la réponse à la question sous le tableau est également correcte.

Question	Pourcentage de réussite dans le groupe associé aux objets tangibles	Pourcentage de réussite dans le groupe associé à la simulation
1	70%	77%
2	13%	9%
3	65%	50%
4	87%	59%

Nous observons alors que les proportions d'élèves complétant intégralement le tableau de la question 2 avec des réponses justes sont très basses. Cette question porte sur les molécules, ce qui montre que les élèves éprouvaient encore des difficultés sur cette notion au moment du test. Par ailleurs, les résultats de la question 1 montrent que les principaux atomes sont mieux connus.

Nous pouvons détailler les résultats de la question 2 afin de mieux identifier les sources du problème :

Ligne	Pourcentage de réussite dans le groupe associé aux objets tangibles	Pourcentage de réussite dans le groupe associé à la simulation
1 (l'eau)	74%	50%
2 (le diazote)	57%	45%
3 (le dihydrogène)	48%	59%
4 (le dioxyde de carbone)	52%	50%
5 (le méthane)	83%	64%
Question sous le tableau	87%	77%

Pour la molécule d'eau, les échecs sont majoritairement dus à une inversion des couleurs sur la représentation de la molécule. Pourtant, la formule brute proposée n'est pas toujours fautive. Plusieurs explications peuvent être proposées :



Figure 16 : Extrait d'une copie d'élève

- Il est possible que ces élèves lisent mal la formule brute de la molécule ( $H_2O$ ) et associent le 2 à l'oxygène et non à l'hydrogène.
- On pourrait penser que ces élèves ont simplement interverti le « code couleur » conventionnel voulant que le rouge soit associé à l'oxygène et le blanc à l'hydrogène. Mais en observant les réponses de ces élèves à la question 1, nous remarquons que cette hypothèse n'est pas valide, les réponses à cette question étant justes.
- On peut imaginer que ces élèves représentent la molécule d'eau de façon « réflexe », sans se relire. Ils représentent donc de façon automatique une molécule coudée avec du rouge et du blanc, mais font une erreur d'étourderie au moment de colorier les différents atomes.

En ce qui concerne le diazote, on observe qu'environ la moitié des élèves ne donnent pas correctement le nom de cette molécule. Ils la désignent souvent par « azote ». Ici, il est possible que le langage courant prenne le pas sur le nom scientifique de cette molécule. Les élèves n'ont donc pas compris (ou ne tiennent pas compte de) la signification du préfixe « di- ». Le problème du langage courant est également rencontré pour la molécule de dioxyde de carbone, que plusieurs élèves nomment « carbone » ou « monoxyde de carbone ».

Nous pouvons remarquer que la question sur le méthane comporte moins d'erreurs que les autres, mais cela est probablement dû à la façon dont cette question est posée. En effet, la dernière ligne du tableau est assez simple à remplir car elle donne déjà le nom de la molécule et sa représentation. L'élève doit simplement indiquer sa formule brute, formule qu'il peut retrouver en raisonnant sur la représentation de la molécule. Cela explique pourquoi plusieurs élèves répondent «  $H_4C$  », réponse que j'ai comptée juste car elle décrit correctement la molécule (l'ordre des atomes dans la formule brute étant une convention).

Enfin, la plupart des élèves répondent correctement à la question sous le tableau, ce qui montre qu'ils ont compris la différence entre un atome et une molécule.

En somme, les résultats des questions 2 (ligne 5), 3 et 4 montrent que la majorité des élèves savent lire et exploiter une formule brute ou la représentation d'une molécule. En réalité, ils se sont trouvés en difficulté sur les questions où il était demandé de restituer une connaissance.

### 3) Résultats du test final

#### a) Pourcentages de réussite moyens

Comme pour le test préliminaire, un pourcentage de réussite est calculé pour chaque élève. Ce test comporte 10 questions, mais à la différence du premier test, les réponses ne peuvent pas être traitées de façon binaire. En effet, les élèves peuvent répondre de façon partiellement correcte aux cinq premières questions, comme nous allons le voir par la suite. L'analyse des réponses est donc traitée avec le barème suivant :

Question	Points
1a	1 point pour « le fer et le dioxygène » (ou « $Fe$ et $O_2$ ») 0,5 point pour une réponse partiellement correcte
1b	1 point pour « $Fe_2O_3$ » (le nom « oxyde de fer (III) » n'est pas attendu) 0,5 point pour une réponse partiellement correcte
1c	1 point si la réponse est « Oui » <b>et</b> que la justification est correcte
2	1 point pour « le nombre de molécules de dihydrogène (ou de $H_2$ ) » 0,5 point si la notion de proportion apparaît, ou de « nombre de molécules », même si le nom de la molécule n'est pas précisé
3	1 point pour « 3 molécules »
4	5 points (1 point par équation correcte)
Total	10 points

À partir de ce barème, une note sur 10 est attribuée à chaque élève. Cette note est ensuite ramenée sur 100 pour obtenir le pourcentage de réussite de chaque participant. Comme pour le test préliminaire, les pourcentages de réussite des 18 élèves ayant suivi l'intégralité de l'expérimentation sont ensuite utilisés pour calculer le pourcentage de réussite moyen de la classe. En suivant cette méthode, la moyenne des pourcentages de réussite est de 49% dans le groupe ayant travaillé avec les objets tangibles. Cette moyenne est de 63% dans la classe associée à la simulation.

#### b) Détails des questions

Les résultats de ce test peuvent être analysés question par question. Mais dans ce cas, il ne serait pas approprié de calculer un pourcentage de réussite pour chaque question. En effet, les réponses obtenues sont très variées et la plupart ne sont ni complètement justes, ni complètement fausses. Il est plus intéressant ici de se pencher sur la répartition des types de réponses obtenues.

Comme pour le premier questionnaire, nous pouvons inclure ici l'intégralité des apprenants ayant répondu à ce test, même ceux n'ayant pas suivi toutes les phases de l'expérimentation, afin d'utiliser le maximum de données. Le nombre d'élèves ayant répondu au questionnaire final est donc de 21 dans le groupe ayant travaillé avec les objets tangibles. Ce nombre est de 19 dans la classe associée à la simulation.

- **Questions 1a et 1b**

Pour rappel, les deux premières questions du test sont les suivantes :



a) Quels sont les réactifs ?

b) Quels sont les produits ?

Réponse	Nombre d'élèves fournissant cette réponse dans le groupe associé aux objets tangibles	Pourcentage d'élèves fournissant cette réponse dans le groupe associé aux objets tangibles	Nombre d'élèves fournissant cette réponse dans le groupe associé à la simulation	Pourcentage d'élèves fournissant cette réponse dans le groupe associé à la simulation
Le fer et le dioxygène (ou $Fe$ et $O_2$ ) sont les réactifs. $Fe_2O_3$ est le produit.	0	0%	0	0%
$4 Fe + 3 O_2$ sont les réactifs, $2 Fe_2O_3$ sont les produits.	14	67%	8	42%
$4 Fe$ et $3 O_2$ sont les réactifs, $2 Fe_2O_3$ sont les produits.	0	0%	5	26%
$4 Fe$ et $3 O_2$ sont les réactifs, $2 Fe_2$ et $O_3$ sont les produits.	1	5%	1	5%
$2 Fe_2O_3$ sont les réactifs, $4 Fe + 3 O_2$ sont les produits.	3	14%	0	0%
Réponses impliquant des atomes (atomes de fer et d'oxygène).	1	5%	2	11%
Autres réponses	2	9%	3	16%
Pas de réponse	0	0%	0	0%
Total	21	100%	19	100%

Un premier constat peut immédiatement être donné à partir de ces chiffres : aucun élève n'a fourni la réponse attendue, à savoir « *Les réactifs sont le fer et le dioxygène. Le produit est Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.* » Les réponses majoritaires (surlignées en jaune dans le tableau) montrent que les apprenants n'ont pas retenu que les réactifs et les produits étaient des espèces chimiques (ou des atomes ou des molécules). Ils ont mémorisé que tous les éléments de la partie gauche de l'équation sont les réactifs, et que ceux placés à droite sont les produits, y compris les nombres stœchiométriques et le signe +. Cela se comprend aisément en observant la trace écrite que les élèves ont reçu lors de la séance d'institutionnalisation (voir ci-dessous) : cette leçon inclut le signe + dans les réactifs. Sur une copie, une élève a surligné l'énoncé pour expliciter sa réponse (voir ci-dessous), et son travail confirme notre interprétation.

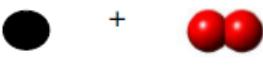
1) Soit l'équation de réaction suivante :  $4 Fe + 3 O_2 \rightarrow 2 Fe_2O_3$

Quels sont les réactifs ?  $4 Fe + 3 O_2$

Quels sont les produits ?  $2 Fe_2O_3$

Figure 18 : Extrait d'une copie d'élève

## II/ Ecriture de ce que l'on appelle l'équation de réaction :

	Réactifs (avant la transformation)	Produits obtenus après
Bilan de la réaction	carbone + dioxygène	dioxyde de carbone
Utilisation des modèles moléculaires		
L'équation de la réaction s'écrit	$C + O_2$	$CO_2$

**Traduction :** un atome de carbone réagit avec une molécule de dioxygène pour donner ou former une molécule de dioxyde de carbone.

Figure 17 : Extrait de la leçon donnée aux élèves

Dans une classe, le résultat est un peu plus nuancé. En effet, quelques élèves ont remplacé le signe + par le mot « et », ce qui prouve qu'ils ont compris la signification du signe +. Cependant, presque tous les élèves incluent le nombre stœchiométrique dans leurs réponses, bien que les résultats des autres questions du test montrent qu'ils connaissent la signification de ce nombre. On pourrait alors interpréter les réponses de la question 1 de deux façons :

- Soit les élèves veulent insister sur la notion de proportion, et ils souhaitent préciser que 4 atomes de fer réagissent avec 3 molécules de dioxygène.
- Soit ils ont établi un raccourci lors de l'apprentissage de leur leçon (ce qui est plus probable). Il est en effet plus facile à mémoriser que l'équation de réaction pourrait se diviser en deux parties, une partie correspondant intégralement aux réactifs, et l'autre aux produits.

Ensuite, deux élèves ont fourni chacun une réponse atypique :

«  $Fe + O_2$  sont les réactifs. 4 et 3 sont les produits. »

« Les réactifs se trouvent dans la partie « calcul » de l'équation. Le produit est le résultat de l'équation. »

Ces réponses montrent que ces apprenants cherchent à donner un sens mathématique à l'équation de réaction. Comme nous l'avons dit précédemment dans ce mémoire, cela se comprend aisément. Premièrement, le nom de ce modèle comporte un terme mathématique (équation). Deuxièmement, les élèves de collège sont beaucoup entraînés à équilibrer les équations de réaction, ce qui s'apparente pour eux à un traitement mathématique.

- **Question 1c**

c) Cette équation de réaction est-elle équilibrée ? Pourquoi ?

Réponse	Nombre d'élèves fournissant cette réponse dans le groupe associé aux objets tangibles	Pourcentage d'élèves fournissant cette réponse dans le groupe associé aux objets tangibles	Nombre d'élèves fournissant cette réponse dans le groupe associé à la simulation	Pourcentage d'élèves fournissant cette réponse dans le groupe associé à la simulation
Cette équation est équilibrée car il y a le même nombre (et les mêmes types) d'atomes dans les réactifs et dans les produits (ou avant et après).	5	24%	12	63%
Cette équation n'est pas équilibrée car il n'y pas le même nombre d'atomes dans les réactifs et les produits. (Mauvais dénombrement et mauvaise lecture des formules brutes.)	12	57%	6	32%
Réponses illisibles	1	5%	0	0%
Pas de réponse	3	14%	1	5%
Total	21	100%	19	100%

Les résultats obtenus à cette question sont assez surprenants. En effet, dans la classe associée à la simulation, environ deux tiers des élèves répondent correctement à la question. Or, lorsque l'on s'intéresse au groupe qui a travaillé avec les objets tangibles, on remarque que moins d'un tiers des apprenants a fourni une réponse correcte. Nous pouvons en déduire que les élèves de ce groupe rencontrent des difficultés à compter les atomes représentés sur une équation de réaction et/ou sur une formule brute.

Voici quelques réponses fournies par des élèves des deux groupes :

« L'équation est équilibrée car on a les mêmes nombres et les mêmes sortes d'atomes dans les réactifs et les produits. »

Groupe des objets tangibles, Élève n°18

« Oui cette équation de réaction est équilibrée car il y a 4 Fe et 6 O dans les réactifs et il y a 4 Fe et 6 O dans les produits. »

Groupe des objets tangibles, Élève n°16

« Oui car on a le même nombre d'atomes dans les produits et les réactifs. 4 Fe dans les réactifs et 4 Fe dans les produits, 6 O<sub>2</sub> dans les réactifs et 6 O<sub>2</sub> dans les produits. »

Groupe associé à la simulation, Élève n°2

« Non car dans les réactifs, il y a 4 atomes de F et dans les produits il y en a 2. »

Groupe des objets tangibles, Élève n°15

« Non car dans les réactifs il y a 4 molécules de fer et 3 de dioxygène, et dans les produits il y a 2 molécules de fer et une d'oxygène. »

Groupe associé à la simulation, Élève n°14

« Non cette équation de réaction n'est pas équilibrée car dans les produits il y a 4 Fe et dans les réactifs il y a seulement 2 Fe. »

Groupe des objets tangibles, Élève n°8

« Non car il y a 6 atomes d'oxygène dans les réactifs et 3 atomes d'oxygène dans les produits. »

Groupe associé à la simulation, Élève n°3

«  $4 \times 1 + 4 \times 1 = 8$      $3 \times 2 = 6$      $8 + 6 = 14$      $(4 + 3) \times 2 = 12$      $14 > 12$   
Non car 14 est supérieur à 12. »

Groupe des objets tangibles, Élève n°13

Qu'elles soient justes ou fausses, ces réponses montrent que la plupart des élèves ont compris qu'une équation de réaction équilibrée doit respecter la conservation des atomes. Ils savent aussi qu'il faut compter les atomes des réactifs et des produits pour la vérifier. Mais c'est au moment de compter que les apprenants rencontrent des difficultés.

Le premier obstacle est mis en avant par les réponses des élèves 2 et 15. Ces participants n'ont pas identifié correctement les différents atomes présents dans les formules brutes des molécules. Une autre difficulté sur la lecture de ces formules apparaît chez les élèves 8 et 3. Ces apprenants n'utilisent pas correctement les nombres stœchiométriques et les indices pour déterminer le nombre d'atomes présents. Ce même problème se retrouve chez l'élève n°14, associé à une autre difficulté : la confusion entre atome et molécule.

Enfin, certains participants fournissent une mauvaise réponse même s'ils ont correctement lu l'équation. C'est le cas de l'élève n°13, qui a réalisé deux erreurs dans son calcul, et qui sont dues soit à un manque d'attention, soit à des difficultés en mathématiques.

Néanmoins, les résultats du test montrent que la tâche demandée n'est pas irréalisable par des élèves de quatrième. En effet, les réponses des élèves 18 et 16 montrent que ces participants savent lire une équation de réaction et compter les atomes sur une formule brute, tout comme l'apprenant qui a produit l'extrait ci-dessous.

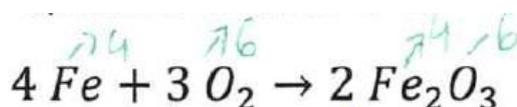


Figure 19 : Extrait d'une copie d'élève

- **Question 2**

2) Soit l'équation de réaction suivante :  $2H_2 + O_2 \rightarrow 2H_2O$

Que signifie le chiffre 2 entouré ci-dessus ?

Réponse	Nombre d'élèves fournissant cette réponse dans le groupe associé aux objets tangibles	Pourcentage d'élèves fournissant cette réponse dans le groupe associé aux objets tangibles	Nombre d'élèves fournissant cette réponse dans le groupe associé à la simulation	Pourcentage d'élèves fournissant cette réponse dans le groupe associé à la simulation
C'est le nombre de molécules de dihydrogène. / Il y a deux molécules de $H_2$ .	12	57%	14	74%
Cela signifie qu'il y a deux molécules. (Le nom « dihydrogène » n'est pas précisé).	7	33%	4	21%
Il y a deux molécules d'hydrogène.	1	5%	0	0%
Il y a deux atomes d'hydrogène.	1	5%	0	0%
Autres réponses.	0	0%	1	5%
Pas de réponse	0	0%	0	0%
Total	21	100%	19	100%

Les résultats obtenus montrent que cette question a peu posé problème. La majorité des élèves comprend qu'un nombre stœchiométrique peut être relié à un nombre de molécules. Cependant, les résultats de la question 1c et de la question 3 montrent que les apprenants ne manipulent pas forcément cette donnée correctement.

- **Question 3**

3) Soit l'équation de réaction suivante :  $N_2 + 3 H_2 \rightarrow 2 NH_3$

Combien de molécules de dihydrogène réagissent avec une molécule de diazote ?

Réponse	Nombre d'élèves fournissant cette réponse dans le groupe associé aux objets tangibles	Pourcentage d'élèves fournissant cette réponse dans le groupe associé aux objets tangibles	Nombre d'élèves fournissant cette réponse dans le groupe associé à la simulation	Pourcentage d'élèves fournissant cette réponse dans le groupe associé à la simulation
Trois molécules de dihydrogène réagissent avec une molécule de diazote.	13	62%	13	68%
Six molécules de dihydrogène (confusion entre atome et molécule).	1	5%	1	5%
Autres proportions.	4	19%	4	21%
Autres réponses	2	10%	0	0%
Pas de réponse	1	5%	1	5%
Total	21	100%	19	100%

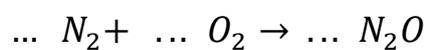
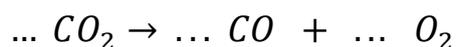
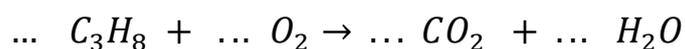
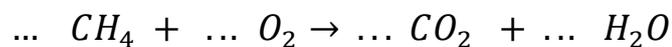
Les réponses à cette question montrent que plus ou moins les deux tiers des élèves semblent avoir compris que le nombre stœchiométrique représente une proportion. Cependant, cette question met de nouveau en lumière la confusion entre atome et molécule. Dans la plupart des mauvaises réponses, les participants ont compté les atomes d'hydrogène présents, et les désignent comme des molécules de dihydrogène.

De plus, parmi les réponses erronées, nous observons que seul un participant dans chaque groupe a dénombré correctement les atomes d'hydrogène. Les autres proportions proposées en réponse à la question 3 sont souvent liées à un mauvais dénombrement de ces atomes.

- **Question 4**

La dernière question du test demande aux élèves d'équilibrer plusieurs équations de réaction. Il est à noter que les deux premières équations ont été vues lors des activités de découverte.

4) Équilibrer les équations de réaction suivantes :



Réponse à la première équation	Nombre d'élèves fournissant cette réponse dans le groupe associé aux objets tangibles	Pourcentage d'élèves fournissant cette réponse dans le groupe associé aux objets tangibles	Nombre d'élèves fournissant cette réponse dans le groupe associé à la simulation	Pourcentage d'élèves fournissant cette réponse dans le groupe associé à la simulation
Réponse correcte.	13	62%	16	84%
Réponse correcte, mais d'autres proportions sont utilisées pour les nombres stœchiométriques.	2	9,5%	2	11%
Une erreur sur le nombre stœchiométrique du carbone.	1	5%	0	0%
Plusieurs nombres stœchiométriques sont faux.	2	9,5%	1	5%
Réponse incomplète	3	14%	0	0%
Pas de réponse	0	0%	0	0%
Total	21	100%	19	100%

Réponse à la deuxième équation	Nombre d'élèves fournissant cette réponse dans le groupe associé aux objets tangibles	Pourcentage d'élèves fournissant cette réponse dans le groupe associé aux objets tangibles	Nombre d'élèves fournissant cette réponse dans le groupe associé à la simulation	Pourcentage d'élèves fournissant cette réponse dans le groupe associé à la simulation
Réponse correcte.	9	43%	11	58%
Réponse correcte, mais d'autres proportions sont utilisées pour les nombres stœchiométriques.	0	0%	2	11%
Une erreur sur le nombre stœchiométrique du méthane.	2	10%	1	5%
Une erreur sur le nombre stœchiométrique du dioxygène.	5	24%	1	5%
Une erreur sur le nombre stœchiométrique de l'eau.	0	0%	2	11%
Plusieurs nombres stœchiométriques sont faux.	3	14%	2	11%
Réponse incomplète	1	5%	0	0%
Pas de réponse	1	5%	0	0%
Total	21	100%	19	100%

Réponse à la troisième équation	Nombre d'élèves fournissant cette réponse dans le groupe associé aux objets tangibles	Pourcentage d'élèves fournissant cette réponse dans le groupe associé aux objets tangibles	Nombre d'élèves fournissant cette réponse dans le groupe associé à la simulation	Pourcentage d'élèves fournissant cette réponse dans le groupe associé à la simulation
Réponse correcte.	6	29%	10	53%
Une erreur sur le nombre stœchiométrique du dioxygène.	4	19%	4	21%
Plusieurs nombres stœchiométriques sont faux.	5	24%	4	21%
Modification d'une formule brute.	1	5%	0	0%
Réponse incomplète	2	10%	0	0%
Pas de réponse	3	14%	1	5%
Total	21	100%	19	100%

Réponse à la quatrième équation	Nombre d'élèves fournissant cette réponse dans le groupe associé aux objets tangibles	Pourcentage d'élèves fournissant cette réponse dans le groupe associé aux objets tangibles	Nombre d'élèves fournissant cette réponse dans le groupe associé à la simulation	Pourcentage d'élèves fournissant cette réponse dans le groupe associé à la simulation
Réponse correcte.	6	29%	9	47%
Réponse correcte, mais d'autres proportions sont utilisées pour les nombres stœchiométriques.	1	5%	0	0%
Une erreur sur le nombre stœchiométrique du dioxyde de carbone.	1	5%	1	5%
Une erreur sur le nombre stœchiométrique du monoxyde de carbone.	0	0%	1	5%
Une erreur sur le nombre stœchiométrique du dioxygène.	1	5%	1	5%
Plusieurs nombres stœchiométriques sont faux.	7	33%	5	26%
Modification d'une formule brute.	1	5%	0	0%
Réponse incomplète	1	5%	0	0%
Pas de réponse	3	14%	2	11%
Total	21	100%	19	100%

Réponse à la cinquième équation	Nombre d'élèves fournissant cette réponse dans le groupe associé aux objets tangibles	Pourcentage d'élèves fournissant cette réponse dans le groupe associé aux objets tangibles	Nombre d'élèves fournissant cette réponse dans le groupe associé à la simulation	Pourcentage d'élèves fournissant cette réponse dans le groupe associé à la simulation
Réponse correcte.	8	38%	12	63%
Réponse correcte, mais d'autres proportions sont utilisées pour les nombres stœchiométriques.	0	0%	1	5%
Une erreur sur le nombre stœchiométrique du diazote.	2	10%	1	5%
Une erreur sur le nombre stœchiométrique du protoxyde d'azote.	3	14%	0	0%
Plusieurs nombres stœchiométriques sont faux.	4	19%	2	11%
Réponse illisible	1	5%	0	0%
Pas de réponse	3	14%	3	16%
Total	21	100%	19	100%

En observant ces chiffres, nous pouvons remarquer plusieurs choses. Premièrement, les équations 1 et 2 (combustion du carbone et combustion du méthane) obtiennent le plus de réponses correctes. Ces résultats étaient prévisibles, car ces deux équations ont été travaillées en classe, notamment lors de l'activité de découverte.

De plus, l'équation de combustion du carbone obtient plus de bonnes réponses que celle du méthane car elle est plus simple à équilibrer. Il n'y a pour ainsi dire aucune modification à apporter sur cette première équation, car elle est déjà équilibrée dans l'énoncé. Cependant, les élèves précisent tous que les nombres stœchiométriques sont de 1, comme ils ont appris à le faire en classe.

Enfin, il est à noter que quelques élèves ont équilibré cette équation dans d'autres proportions (avec tous les nombres stœchiométriques égaux à 2 ou 3). Ces réponses sont justes, mais elles montrent que les élèves ont estimé que l'équation n'était pas équilibrée dans sa forme initiale. Ces participants ont donc commis une erreur en comptant les atomes sur l'énoncé, mais ils n'ont pas reproduit cette erreur lorsqu'ils ont modifié les nombres stœchiométriques.

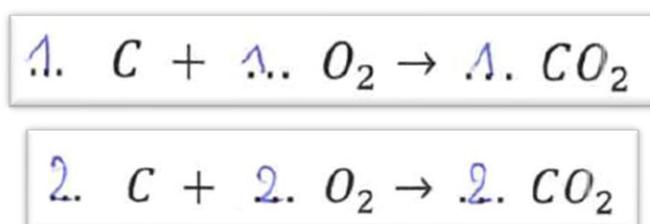


Figure 20 : Extraits de copies d'élèves

En ce qui concerne les trois dernières équations, l'équation 5 obtient de meilleurs résultats que les équations 3 et 4. Cela peut s'expliquer en remarquant que cette équation de réaction ne comporte qu'un seul corps composé, alors que les deux autres équations en possèdent plusieurs. Le dénombrement des atomes est donc plus facile dans la dernière équation.

Notons qu'un élève a tenté de modifier plusieurs formules brutes en ajoutant des atomes dans l'espace dédié au nombre stœchiométrique. Deux explications à ce comportement sont possibles : soit ce participant n'a pas compris la tâche qui lui est demandé (écrire des nombres stœchiométriques) ; soit cet apprenant ne trouvait pas la réponse et a tenté une autre méthode de résolution.

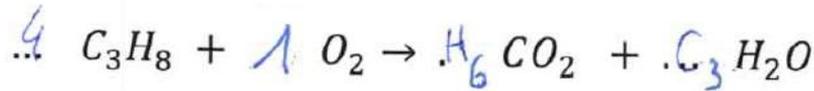


Figure 21 : Extrait d'une copie d'élève

Enfin, plusieurs productions très encourageantes montrent que des élèves ont appris quelque chose de nouveau et qu'ils souhaitent le montrer. Il est également possible que ces annotations constituent des aides à la résolution, mais elles ont été réalisées par les apprenants eux-mêmes.

Les extraits de copies ci-dessous proviennent presque tous du groupe associé à la simulation. Nous pouvons observer des dessins de molécules sur plusieurs copies. Un élève a surligné les formules brutes pour associer chaque atome à son indice. Et un participant a noté directement le nombre d'atomes de chaque type contenu dans une molécule ou dans un groupe de molécules.

Ces réalisations montrent que ces élèves ont compris la méthode pour lire une formule brute, et que certains savent compléter cette lecture en utilisant les nombres stœchiométriques afin de dénombrer les atomes dans une équation. L'enseignement a donc porté ses fruits, même si quelques erreurs (probablement imputables à des difficultés en mathématiques) persistent dans les réponses proposées.

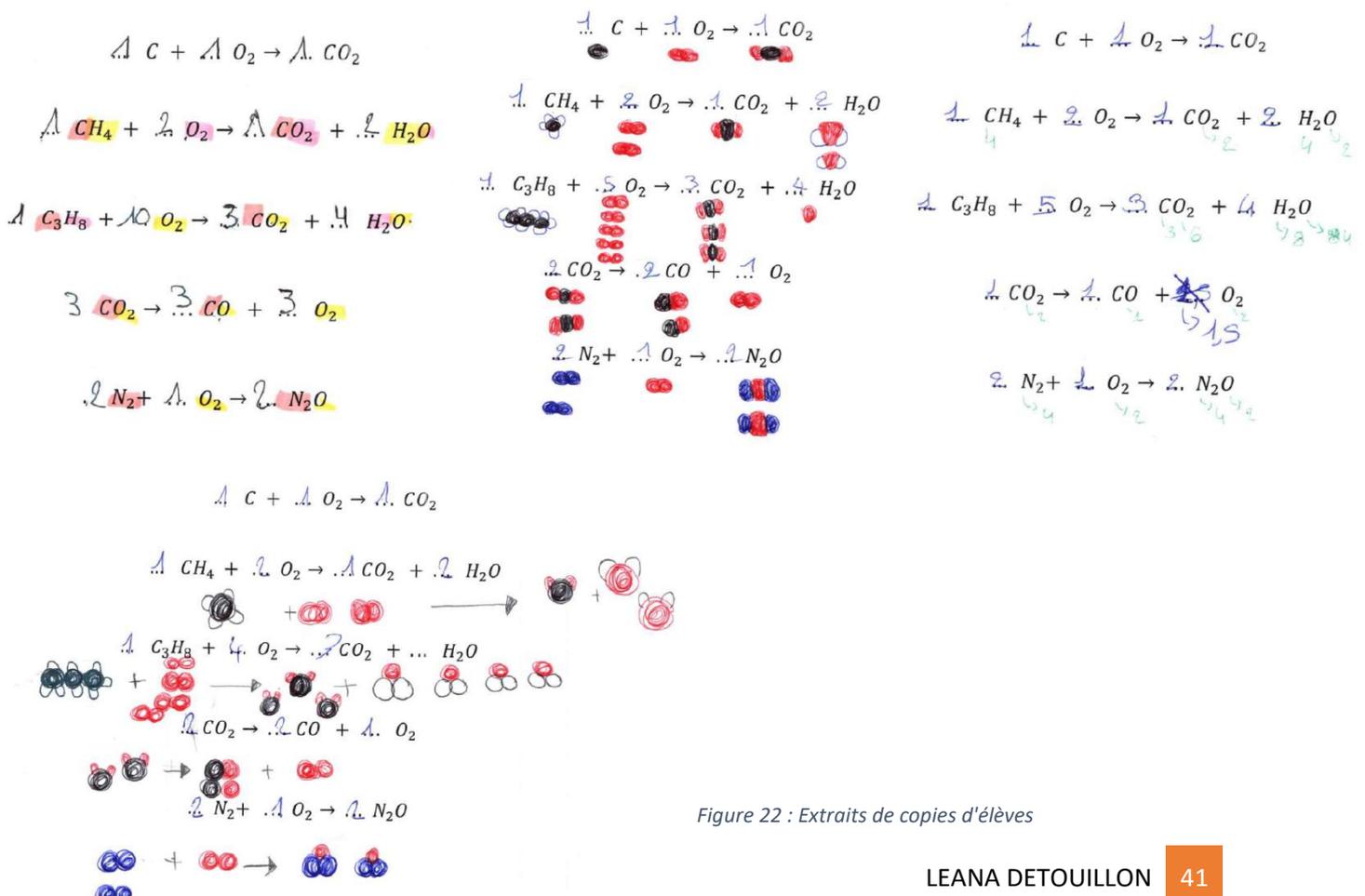


Figure 22 : Extraits de copies d'élèves

## VI) Discussion

### 1) Conclusion de l'étude de cas

Pour tirer une conclusion de cette analyse, reprenons les chiffres majeurs. Lors du questionnaire préliminaire, la classe associée aux objets tangibles a obtenu un pourcentage de réussite moyen égal à 80%. Pour la classe ayant travaillé avec la simulation, cette valeur est de 73%. Avec le questionnaire final, le groupe des objets tangibles a obtenu une moyenne de 49%. Pour le groupe associé à la simulation, cette moyenne est de 63%.

Le premier élément que nous pouvons remarquer est que les moyennes du second test sont plus faibles que les moyennes du premier test. Cela semble normal, car les notions que les élèves ont eu à apprendre et à comprendre se sont complexifiées au fil de la séquence d'apprentissage. Si identifier les molécules et les atomes usuels et lire une formule brute semblent simples, comprendre et exploiter une équation de réaction apparaît comme une nouvelle marche à franchir pour les apprenants.

Ensuite, ces chiffres montrent que la classe associée à la simulation a largement devancé le second groupe en fin d'expérimentation. Les résultats de la classe ayant travaillé avec les objets tangibles ont dégringolé entre les deux tests, jusqu'à être inférieurs à la moyenne au test final. La conclusion de cette étude de cas est donc en faveur de la simulation.

Mais comme nous l'avons vu précédemment, la recherche en didactique des sciences montre qu'une activité avec des objets tangibles est souvent plus à même de faire progresser les élèves qu'une séance avec une simulation (Boivin-Delpieu (2020) et Bécu-Robinault (1997)). Il est donc assez surprenant d'obtenir en fin d'expérience des résultats en faveur de la simulation et avec un tel écart entre les deux méthodes de travail.

D'autres éléments sont à prendre en compte pour nuancer ce résultat. En effet, à la lecture des copies des deux groupes, il apparaît que les élèves associés aux objets tangibles fournissent régulièrement des réponses avec des erreurs assez importantes. Cela se vérifie avec les résultats de la question 1c, où les proportions de bonnes et de mauvaises réponses sont quasiment « inversées » entre les deux classes.

De plus, la perception que j'ai eue des élèves n'était pas la même dans les deux groupes. Cela est peut-être dû aux modalités pédagogiques (simulation ou objets tangibles). Malgré tout, j'ai eu le sentiment que les élèves que j'ai observés en salle informatique étaient plus sérieux et concentrés que ceux de l'autre groupe. Dans le groupe des objets tangibles, j'ai vu plus d'élèves passifs, ou s'amusant à faire autre chose. Le rapport à l'outil peut alors être mis en question. En supposant que les élèves soient plus attirés par les écrans que par les objets tangibles, la motivation et la concentration des apprenants ont-elles été intensifiées en salle informatique ?

Comme souvent dans l'enseignement et dans les sciences sociales en général, le contexte ainsi que les aspects humains très particuliers et imprévisibles des participants viennent toujours nuancer les résultats. Et dans le cas de cette étude, bien que nous devions conclure en faveur de la simulation, je me questionne toujours quant à l'influence du caractère des élèves dans mon étude. Si la simulation a obtenu plus de succès que les objets tangibles, est-ce parce que cette modalité pédagogique est plus adaptée dans le cadre de la chimie ; ou est-ce dû au rapport au travail des élèves ayant travaillé avec les objets tangibles ? Pour le savoir, il faudrait refaire cette expérience avec d'autres classes, et augmenter le nombre de participants.

## 2) Discussion sur le protocole expérimental

Plusieurs aspects de cette étude de cas auraient pu être traités différemment et peuvent être discutés. Premièrement, j'ai proposé une activité avec les objets tangibles la plus fidèle possible à la simulation, afin que la seule différence entre les deux séances soit le matériel employé. Dans ce cadre, j'ai demandé explicitement aux élèves de ne pas déconstruire les modèles moléculaires en plastique. Cependant, l'intérêt de l'activité proposée habituellement avec ces modèles en plastique est justement de pouvoir déconstruire les réactifs pour reconstituer les produits. Mon étude de cas ne prend pas en compte cet aspect. Il est donc possible que mon travail ne compare pas tout à fait une activité avec des objets tangibles à une simulation, mais que cette étude compare plutôt deux modes de présentation d'une activité. Il aurait été intéressant de proposer une troisième activité, où cette fois les objets tangibles auraient pu être modifiés.

Ensuite, la définition d'une équation de réaction équilibrée que j'ai proposée dans les activités pourrait aussi être discutée. Cette définition apparaissait dans un encadré sur les énoncés distribués aux élèves. Les apprenants devaient lire cette définition, puis ils pouvaient prendre le temps nécessaire pour se l'approprier.

Au cours d'une transformation chimique, aucun atome n'est créé ni détruit. On dit qu'il y a conservation des atomes. Une équation de réaction est équilibrée s'il y a le même nombre d'atomes de chaque type dans les réactifs et les produits.

Figure 23 : Définition proposée dans les activités d'une équation de réaction équilibrée

De fait, il est assez difficile de définir en quelques mots une équation de réaction équilibrée à des apprenants qui découvrent ce modèle. Par conséquent, cette définition est loin d'être parfaite, et elle a posé des problèmes de compréhension à quelques élèves.

Certains ont pensé qu'il suffisait d'avoir le même nombre d'atomes dans les réactifs et dans les produits, quels que soient les types d'atomes. Une équation comportant un atome de carbone pour quatre atomes d'hydrogène dans les réactifs, et quatre atomes de carbone pour un atome d'hydrogène dans les produits serait donc équilibrée, car il y a au total cinq atomes dans les réactifs et cinq atomes dans les produits.

Un autre élève s'est également demandé si tous les nombres stœchiométriques devaient être égaux. Cependant, le problème était généralement vite résolu, en reformulant à l'oral cette définition.

## VII) Conclusion

L'étude de cas présentée ici a comparé les effets d'une activité avec des objets tangibles et ceux obtenus avec une simulation pour déterminer la modalité la plus intéressante pour enseigner l'équation de réaction à des élèves de quatrième.

Deux classes semblables ont suivi la même succession de tâches dans des conditions les plus similaires possibles, la seule différence entre les deux groupes étant le support pédagogique (objets tangibles ou simulation informatique). Les participants ont répondu à un premier questionnaire pour évaluer leurs connaissances sur les atomes et molécules usuels, ainsi que leur compétence à déchiffrer des formules brutes. Les apprenants ont ensuite été confrontés à une activité de découverte sur l'équation de réaction impliquant un support pédagogique réel ou virtuel. Après un temps d'institutionnalisation et d'entraînement, les élèves ont finalement répondu à un dernier questionnaire mesurant leur compétence à lire et équilibrer des équations de réaction.

Suite au recueil d'un nombre important de données, les principaux obstacles didactiques recensés dans la littérature ont été retrouvés :

- La difficulté à lire des formules brutes. Cela a particulièrement été observé sur la formule de l'oxyde de fer (III), où certains élèves ne parvenaient pas à identifier correctement les atomes constituant cette molécule.
- La juxtaposition des corps simples, identifiée par Dumon et Laugier (2004), et que j'ai retrouvé dans le cas de l'eau.
- La confusion entre mélange et transformation chimique : « *Les réactifs se mélangent pour donner les produits* ».
- L'usage trop mathématique de l'équation de réaction dû à une polysémie des symboles et à la définition de certains termes, dont « réactifs » et « produits ». La totalité des élèves considère que les réactifs sont l'ensemble des écritures, symboles + compris, dans la partie gauche de l'équation de réaction. Et de façon symétrique, les produits sont vus comme l'intégralité de la partie droite de l'équation.
- La difficulté à manipuler de façon conjointe des nombres stœchiométriques et des indices pour dénombrer des atomes. Ce problème peut être dû à une difficulté d'interprétation de l'équation de réaction et/ou à des lacunes en mathématiques.

Les résultats du second test montrent qu'une part importante des élèves de chaque classe a acquis des savoirs et des compétences au sujet de l'équation de réaction, mais une maîtrise totale du sujet est rarement observée. La modélisation d'une transformation chimique présente toujours des difficultés pour la majorité des apprenants.

En comparant les moyennes obtenues au test final, il apparaît que la simulation a été plus efficace pour faire comprendre le modèle de l'équation de réaction aux apprenants. Néanmoins, cette conclusion doit être nuancée, en raison des profils des différents participants, qui ont eu un impact non négligeable – mais difficile à mesurer – sur les résultats.

Reproduire cette étude permettrait d'affiner les résultats obtenus, en augmentant le nombre de participants afin de réduire l'influence de ces différents profils. Il serait également intéressant d'inclure un troisième type d'activité de découverte semblable à celle menée avec les objets tangibles, mais où la modification des modèles moléculaires serait permise.

Enfin, une tâche supplémentaire a été donnée aux élèves, environ 4 mois après le test final. Nous leur avons demandé d'écrire les mots ou groupes de mots leur venant à l'esprit quand ils entendent l'expression « équation de réaction ». Après comptage des réponses dans les deux groupes, les nuages de mots ci-dessous ont pu être établis.



Figure 24 : Nuage de mots obtenu dans le groupe associé aux objets tangibles (à gauche) et dans le groupe associé à la simulation (à droite)

En observant ces nuages de mots, nous pouvons remarquer que les participants des deux groupes proposent des termes très similaires. Les mots les plus cités sont « molécules », « atomes », « transformation », et « réactifs ». Les élèves ont donc mémorisé qu'une équation de réaction modélise une transformation chimique, et qu'elle comporte des réactifs, des atomes et des molécules. Le terme « produits » est également évoqué, mais moins souvent.

Ceci montre que ces élèves de quatrième sont capables de décrire une équation de réaction. Nous pouvons en déduire que la séquence d'enseignement a atteint ses objectifs. Cependant, si ce test était réalisé en classe de troisième ou au lycée, il serait souhaitable que les participants mentionnent la réorganisation des atomes, ou la notion de proportion.

En considérant les quatre mots les plus cités par les participants, nous pouvons repenser à l'analogie proposée par Mzoughi-Khadhraoui et Dumon (2012). Selon ces auteurs, l'équation de réaction peut être vue comme une phrase, dont les espèces chimiques seraient les mots, et où les éléments chimiques correspondraient aux lettres de l'alphabet. Les résultats présentés ci-dessus montrent alors que cette analogie est tout à fait appropriée pour comprendre ce que les élèves ont appris. En leur demandant de décrire une phrase (i.e. une équation de réaction), les apprenants parlent de mots et de lettres (i.e. des molécules et des atomes à leur niveau<sup>2</sup>). Ils évoquent aussi la notion de groupe nominal (i.e. réactif) ainsi que le sens de la phrase (i.e. la transformation).

Enfin, une dernière conclusion peut être tirée de ces résultats. Parmi les expressions un peu moins citées, on retrouve beaucoup de notions mathématiques, telles que « addition », « multiplication », « chiffres » ou « égalité ». Cela montre de nouveau que beaucoup d'élèves ont encore une vision trop mathématique de l'équation de réaction.

<sup>2</sup> La distinction entre « molécule » et « espèce chimique » ; et entre « atome » et « élément chimique » n'est pas encore claire pour des élèves de cycle 4.

VIII) Annexes

Questionnaire n°1 (non noté)

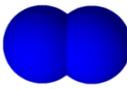
1) Complétez le tableau suivant :

Nom	Représentation	Symbole
Hydrogène		
Carbone		
		N
Oxygène		

Le tableau ci-dessus contient-il des atomes ou des molécules ? Justifier.

.....

2) Complétez ce deuxième tableau :

Nom	Représentation	Formule
Eau		
		$N_2$
Dihydrogène		
		$CO_2$
Méthane		

Le tableau ci-dessus contient-il des atomes ou des molécules ? Justifier.

.....

3) La formule brute du protoxyde d'azote est  $N_2O$ . Indiquez les noms des atomes présents dans cette molécule et précisez leur nombre.

.....

.....

4) Que signifie le 6 dans la formule  $C_2H_6O$  ?

.....

.....

(Document élèves pour l'activité avec les objets tangibles)

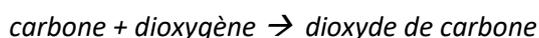
Activité de découverte : l'équation de réaction

Nous avons vu en cours que la matière était constituée d'atomes et de molécules. **Dans cette activité, nous allons voir comment ces molécules réalisent des transformations chimiques.**

Merci d'indiquer les Noms, Prénoms et Classe des membres du groupe au dos de chaque feuille.

1) La combustion du carbone

La combustion du carbone est une réaction entre le carbone et le dioxygène de l'air formant du dioxyde de carbone. Dans un premier temps, nous pouvons la représenter avec l'équation de réaction suivante :



- 1) Complétez l'équation sur la grande feuille avec les formules brutes des molécules, puis appelez la professeure.

Au cours d'une transformation chimique, aucun atome n'est créé ni détruit. On dit qu'il y a conservation des atomes. Une équation de réaction est équilibrée s'il y a le même nombre d'atomes de chaque type dans les réactifs et les produits.

- 2) Votre équation de réaction est-elle équilibrée ? Répondez ci-dessous en justifiant :

.....

- 3) Devez-vous faire des modifications pour équilibrer votre équation de réaction ? Si oui, lesquelles ?

.....

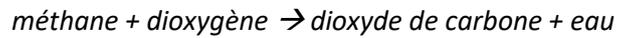
.....

- 4) Écrivez ci-dessous votre équation de réaction équilibrée.

.....

## II) La combustion du méthane

La combustion du méthane est une réaction entre le méthane et le dioxygène de l'air formant du dioxyde de carbone et de l'eau. Comme dans la partie précédente, nous pouvons la représenter avec l'équation de réaction suivante :



1) Complétez l'équation sur la grande feuille avec les formules brutes des molécules, puis appelez la professeure.

2) Votre équation de réaction est-elle équilibrée ? Répondez ci-dessous en justifiant :

.....

3) Devez-vous faire des modifications pour équilibrer votre équation de réaction ? Si oui, lesquelles ?

.....

.....

4) Écrivez ci-dessous votre équation de réaction équilibrée.

.....

### III) La combustion du butane

La combustion du butane est une réaction entre le butane et le dioxygène de l'air formant du dioxyde de carbone et de l'eau. Nous pouvons la représenter avec l'équation de réaction suivante :



1) Complétez l'équation sur la grande feuille avec les formules brutes des molécules, puis appelez la professeure.

2) Votre équation de réaction est-elle équilibrée ? Répondez ci-dessous en justifiant :

.....

3) Devez-vous faire des modifications pour équilibrer votre équation de réaction ? Si oui, lesquelles ?

.....

.....

4) Écrivez ci-dessous votre équation de réaction équilibrée, en utilisant les formules brutes des différentes molécules.

.....

## (Document élèves pour l'activité avec la simulation)

### Activité de découverte : l'équation de réaction

Nous avons vu en cours que la matière était constituée d'atomes et de molécules. **Dans cette activité, nous allons voir comment ces molécules réalisent des transformations chimiques.**

Merci d'indiquer les Noms, Prénoms et Classe des membres du groupe au dos des trois feuilles.

Lancez la simulation *reactions\_chimiques.exe* disponible dans l'espace commun (ou téléchargez le fichier .exe à l'adresse suivante :

[https://www.pccl.fr/physique\\_chimie\\_college\\_lycee/quatrieme/chimie/reactions\\_chimiques.htm](https://www.pccl.fr/physique_chimie_college_lycee/quatrieme/chimie/reactions_chimiques.htm) )

#### 1) La combustion du carbone

La première réaction proposée par la simulation est la combustion du carbone. Comme vous pouvez le voir à l'écran, cette réaction entre le carbone et le dioxygène produit du dioxyde de carbone.

- 1) La simulation vous demande de choisir les formules brutes des réactifs et des produits. AVANT DE CLIQUER SUR VALIDER, indiquez vos choix dans le tableau ci-dessous.

Nom	Formule
Carbone	
Dioxygène	
Dioxyde de carbone	

- 2) APRES AVOIR VALIDÉ, indiquez ici les erreurs et leur correction si vous vous êtes trompés :

.....

Au cours d'une transformation chimique, aucun atome n'est créé ni détruit. On dit qu'il y a conservation des atomes. Une équation de réaction est équilibrée s'il y a le même nombre d'atomes de chaque type dans les réactifs et les produits.

- 3) Pensez-vous que l'équation de réaction affichée à l'écran est équilibrée ? Répondez ci-dessous en justifiant :

.....

- 4) AVANT DE CLIQUER SUR VALIDER, devez-vous faire des modifications pour équilibrer votre équation de réaction ? Si oui, lesquelles ?

.....

- 5) APRES AVOIR VALIDÉ, indiquez ici les erreurs et leur correction si vous vous êtes trompés :

.....

- 6) Recopiez ici l'équation de réaction équilibrée.

.....

## II) La combustion du méthane

La combustion du méthane est une réaction entre le méthane et le dioxygène de l'air formant du dioxyde de carbone et de l'eau.

- 1) La simulation vous demande de choisir les formules brutes des réactifs et des produits. AVANT DE CLIQUER SUR VALIDER, indiquez vos choix dans le tableau ci-dessous.

Nom	Formule
Méthane	
Dioxygène	
Dioxyde de carbone	
Eau	

- 2) APRES AVOIR VALIDÉ, indiquez ici les erreurs et leur correction si vous vous êtes trompés :

.....

- 3) Pensez-vous que l'équation de réaction affichée à l'écran est équilibrée ? Répondez ci-dessous en justifiant :

.....

- 4) AVANT DE CLIQUER SUR VALIDER, devez-vous faire des modifications pour équilibrer votre équation de réaction ? Si oui, lesquelles ?

.....

.....

- 5) APRES AVOIR VALIDÉ, indiquez ici les erreurs et leur correction si vous vous êtes trompés :

.....

- 6) Recopiez ici l'équation de réaction équilibrée.

.....

### III) La combustion du butane

La combustion du butane est une réaction entre le butane et le dioxygène de l'air formant du dioxyde de carbone et de l'eau.

- 1) La simulation vous demande de choisir les formules brutes des réactifs et des produits. AVANT DE CLIQUER SUR VALIDER, indiquez vos choix dans le tableau ci-dessous.

Nom	Formule
Butane	
Dioxygène	
Dioxyde de carbone	
Eau	

- 2) APRES AVOIR VALIDÉ, indiquez ici les erreurs et leur correction si vous vous êtes trompés :

.....

- 3) Pensez-vous que l'équation de réaction affichée à l'écran est équilibrée ? Répondez ci-dessous en justifiant :

.....

- 4) AVANT DE CLIQUER SUR VALIDER, devez-vous faire des modifications pour équilibrer votre équation de réaction ? Si oui, lesquelles ?

.....

.....

- 5) APRES AVOIR VALIDÉ, indiquez ici les erreurs et leur correction si vous vous êtes trompés :

.....

- 6) Recopiez ici l'équation de réaction équilibrée.

.....

## Questionnaire n°2 (non noté)

1) Soit l'équation de réaction suivante :  $4 Fe + 3 O_2 \rightarrow 2 Fe_2O_3$

a) Quels sont les réactifs ?

.....

b) Quels sont les produits ?

.....

c) Cette équation de réaction est-elle équilibrée ? Pourquoi ?

.....

.....

2) Soit l'équation de réaction suivante :  $2 H_2 + O_2 \rightarrow 2 H_2O$

Que signifie le chiffre 2 entouré ci-dessus ?

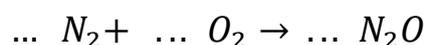
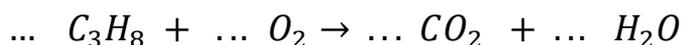
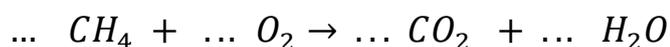
.....

3) Soit l'équation de réaction suivante :  $N_2 + 3 H_2 \rightarrow 2 NH_3$

Combien de molécules de dihydrogène réagissent avec une molécule de diazote ?

.....

4) Équilibrer les équations de réaction suivantes :



## IX) Bibliographie

- Beaufils, Daniel, et Bernard Richoux. « Un schéma théorique pour situer les activités avec des logiciels de simulation dans l'enseignement de la physique ». *Didaskalia*, n° 23 (2003): 9-38.
- Becu-Robinault, Karine. « Activités de modélisation des élèves en situation de travaux pratiques traditionnels : introduction expérimentale du concept de puissance ». *Didaskalia*, n° 11 (1997): 7-37. <https://doi.org/10.4267/2042/23842>.
- Bécu-Robinault, Karine. « Raisonnements des élèves et sciences physiques ». In *Comprendre les apprentissages : sciences cognitives et éducation*, Dunod. Paris, 2004.
- Boivin-Delpieu, Géraldine. « Comparaison de situations d'enseignement et d'étude des mouvements de la Terre avec des objets tangibles et des objets numériques au cycle 3 ». *Éducation & didactique* 14, n° 3 (2020): 9-38.
- Canac, Sophie. « Registre symbolique de la chimie (1/2) : les spécificités de ce langage ». CultureSciences-Chimie, 6 novembre 2020. <https://culturesciences.chimie.ens.fr/thematiques/enseignement-de-la-chimie/didactique/registre-symbolique-de-la-chimie-12-les>.
- Canac, Sophie. « Registre symbolique de la chimie (2/2) : difficultés d'apprentissage ». CultureSciences-Chimie, 19 novembre 2020. <https://culturesciences.chimie.ens.fr/thematiques/enseignement-de-la-chimie/didactique/registre-symbolique-de-la-chimie-22-difficultes-d>.
- CEA. « La démarche scientifique ». CEA/Découvrir & Comprendre. CEA, 19 septembre 2018. <https://www.cea.fr/comprendre/Pages/physique-chimie/essentiel-sur-demarche-scientifique.aspx>.
- Chi, Michelene T. H., James D. Slotta, et Nicholas de Leeuw. « From Things to Processes : a Theory of Conceptual Change for Learning Science Concepts ». *Learning and Instruction* 4 (1994): 27-43.
- Chomat, A., C. Larcher, et M. Meheut. « Modèle particulière et activités de modélisation en classe de quatrième ». *Aster*, n° 7 (1988). <https://doi.org/10.4267/2042/9222>.
- Cousinat, Sonia. « La transformation chimique au cycle 4 ». *TDC*, n° 1126 (s. d.).
- Dehon, Jérémy, et Philippe Snauwaert. « L'équation de réaction : une équation à plusieurs inconnues. Etude de productions d'élèves de 16-17 ans (grade 11) en Belgique francophone ». *RDST*, n° 12 (15 novembre 2015): 209-35. <https://doi.org/10.4000/rdst.1174>.
- Droui, Mohamed, et Abdelkrim El Hajjami. « Simulations informatiques en enseignement des sciences : apports et limites ». *Association Enseignement Public & Informatique*, avril 2014. <https://www.epi.asso.fr/revue/articles/a1404e.htm>.
- Drouin, A.-M. « Le modèle en questions ». *Aster*, n° 7 (1988). <https://doi.org/10.4267/2042/9214>.
- Dumon, Alain, et André Laugier. « L'équation de réaction : approche historique et didactique de la modélisation de la transformation chimique. » *Union des Professeurs de Physique et de Chimie* 98 (2004).
- Fillon, Pierre. « Des élèves dans un labyrinthe d'obstacles. » *Aster*, n° 25 (1997).
- Genzling, J. C. « Les modèles particuliers ». *Aster*, n° 7 (1988). <https://doi.org/10.4267/2042/9217>.

- Gredler, Margaret. « Games and Simulations and Their Relationships to Learning ». In *Handbook of research on educational communications and technology*, Lawrence Erlbaum Associates Publishers., 571-81, 2004.
- Johnstone, A. H. « The Development of Chemistry Teaching: A Changing Response to Changing Demand ». *Journal of Chemical Education* 70, n° 9 (septembre 1993): 701. <https://doi.org/10.1021/ed070p701>.
- Kermen, Isabelle. « Comment le caractère dual, macroscopique-microscopique, de la chimie s'incarne-t-il dans son enseignement? Réflexions autour des modèles et du langage ». *Le Bulletin de l'Union des Professeurs de Physique et de Chimie*, 2018, 95-108.
- Le Coarer, Jacques. « La réaction chimique et l'équation de réaction ». In *Chimie, le minimum à savoir*, EDP Sciences., 47, 2003.
- Le Maréchal, Jean-François, et Karine Bécu-Robinault. « La simulation en chimie au sein du projet Microméga® ». *Aster* 43, n° 43, p. 7 (2006). <https://doi.org/10.4267/2042/16803>.
- Lelivrescolaire.fr. *Physique-Chimie Cycle 4*, 2017. <https://fr.calameo.com/read/000596729a478266ce0b6?authid=kye07xmwkoHr>.
- Lemeignan, G., et A. Weil - Barais. « Gestion d'activités de modélisation en classe ». *Aster*, n° 7 (1988). <https://doi.org/10.4267/2042/9221>.
- « Les TICE, c'est quoi ? », 25 février 2013. <https://www.tice-education.fr/tous-les-articles-er-ressources/articles-informatiques/719-les-tices-cest-quoi>.
- « Modélisation des transformations chimiques de la matière et transfert d'énergie - Physique-Chimie - Seconde ». Consulté le 13 avril 2021. [https://www.assistancescolaire.com/eleve/2nde/physique-chimie/reviser-le-cours/2\\_ph\\_04](https://www.assistancescolaire.com/eleve/2nde/physique-chimie/reviser-le-cours/2_ph_04).
- Morge, Ludovic, et Anne-Marie Doly. « L'enseignement de notion de modèle : quels modèles pour faire comprendre la distinction entre modèle et réalité ? » *Spirale. Revue de recherches en éducation*, n° 52 (2013): 149-75. <https://doi.org/10.3406/spira.2013.1066>.
- Mzoughi-Khadhraoui, Imène, et Alain Dumon. « L'appropriation par des élèves tunisiens débutants du langage permettant de représenter la réaction chimique. » *RDST*, n° 6 (2012): 89-118. <https://doi.org/10.4000/rdst.107>.
- Oget, David, et Jacques Audran. « Simulation ». *Recherche et Formation*, n° 82 (30 septembre 2016): 75-84. <https://doi.org/10.4000/rechercheformation.2672>.
- PCCL. « Equilibrer les équations-bilans des réactions chimiques ». Consulté le 15 novembre 2021. [https://www.pccl.fr/physique\\_chimie\\_college\\_lycee/quatrieme/chimie/reactions\\_chimiques.htm](https://www.pccl.fr/physique_chimie_college_lycee/quatrieme/chimie/reactions_chimiques.htm).
- Pélissier, Lionel, et Patrice Venturini. « Analyse praxéologique de l'enseignement de l'épistémologie de la physique : le cas de la notion de modèle ». *Education & Didactique* 10, n° 2 (8 juillet 2016): 63-90. <https://doi.org/10.4000/educationdidactique.2502>.
- Physique-Chimie Cycle 4 Manuel de l'élève Programme 2016*. Bordas. Regaud-Vento, 2017.
- Physique-Chimie Cycle 4, Manuel de l'enseignant, Programme 2016*. Bordas. Espace, 2017.
- Rouquérol, Françoise, Gilberte Chambaud, Roland Lissillour, et Abdou Boucekkine. « Mécanismes réactionnels ». In *Chimie générale*, Dunod., 567 à 582. Les cours de Paul Arnaud, 2006.

- Roy, Patrick, et Abdelkrim Hasni. « Les modèles et la modélisation vus par des enseignants de sciences et technologies du secondaire au Québec ». *McGill Journal of Education* 49, n° 2 (2014): 349-71. <https://doi.org/10.7202/1029424ar>.
- Sanchez, Éric. « Quelles relations entre modélisation et investigation scientifique dans l'enseignement des sciences de la terre? » *Éducation et didactique* 2, n° 2 (1 septembre 2008): 93-118. <https://doi.org/10.4000/educationdidactique.314>.
- Scott, Philip H. « Pathways in Learning Science : A Case Study of the Development of One Student's Ideas Relating to the Structure of Matter », 1992, 203-24.
- Soudani, Mohamed, Olfa Soudani-Bani, Ezio Roletto, et Alberto Regis. « Fonctionnement sémiotique et construction des modèles en chimie. Un cadre d'analyse peircien. » *RDST*, n° 9 (2014): 179-208. <https://doi.org/10.4000/rdst.881>.
- « Sujet de l'épreuve d'exploitation d'un dossier documentaire du CAPES 2021 ». Consulté le 15 avril 2021. [https://media.devenirenseignant.gouv.fr/file/capes\\_externes/85/8/s2021\\_capes\\_externes\\_physique\\_chimie\\_2\\_1394858.pdf](https://media.devenirenseignant.gouv.fr/file/capes_externes/85/8/s2021_capes_externes_physique_chimie_2_1394858.pdf).
- Tiberghien, Andrée. « Modeling as a basis for analyzing teaching - Learning situations ». *Learning and Instruction* 4 (1997): 71-87.
- Tiberghien, Andrée. « Modélisation des savoirs dans la classe en didactique de la physique ». *Recherches en éducation*, n° 29 (1 juin 2017). <https://doi.org/10.4000/ree.2957>.
- Tricot, André, et Franck Amadiou. *Apprendre avec le numérique*. Retz. Mythes et réalités, 2014.
- University of Colorado Boulder. « Equilibrer les équations chimiques ». Consulté le 15 novembre 2021. [https://phet.colorado.edu/sims/html/balancing-chemical-equations/latest/balancing-chemical-equations\\_fr.html](https://phet.colorado.edu/sims/html/balancing-chemical-equations/latest/balancing-chemical-equations_fr.html).
- University of Colorado Boulder. « Simulations interactives PhET ». PhET. Consulté le 16 avril 2021. <https://phet.colorado.edu/fr/simulations/browse>.