

THESIS / THÈSE

MASTER EN SCIENCES CHIMIQUE À FINALITÉ DIDACTIQUE

La technique du slowmation comme outil de représentation du mécanisme de la réaction chimique par des élèves de l'enseignement secondaire

Simon, Justine

Award date:
2019

Awarding institution:
Université de Namur

[Link to publication](#)

General rights

Copyright and moral rights for the publications made accessible in the public portal are retained by the authors and/or other copyright owners and it is a condition of accessing publications that users recognise and abide by the legal requirements associated with these rights.

- Users may download and print one copy of any publication from the public portal for the purpose of private study or research.
- You may not further distribute the material or use it for any profit-making activity or commercial gain
- You may freely distribute the URL identifying the publication in the public portal ?

Take down policy

If you believe that this document breaches copyright please contact us providing details, and we will remove access to the work immediately and investigate your claim.



Université de Namur
Faculté des Sciences

**LA TECHNIQUE DU SLOWMATION COMME OUTIL DE REPRÉSENTATION
DU MÉCANISME DE LA RÉACTION CHIMIQUE PAR DES ÉLÈVES DE
L'ENSEIGNEMENT SECONDAIRE**

**Mémoire présenté pour l'obtention
du grade académique de Master Chimie « Chimie du Vivant et des Nanomatériaux » : Finalité Didactique**

Justine SIMON

Janvier 2019

La technique du slowmation comme outil de représentation du mécanisme de la réaction chimique par des élèves de l'enseignement secondaire

SIMON Justine

Résumé :

La lecture des référentiels de l'enseignement secondaire en Fédération Wallonie-Bruxelles (FWB) nous informe que la réaction chimique est un concept peu abordé au niveau microscopique, au cours de chimie. Or, cette représentation microscopique de la réaction chimique est connectée aux notions d'équation chimique, de molécules, d'états de la matière, etc. L'analyse de productions d'élèves rendant compte d'une représentation dynamique de la réaction chimique au niveau microscopique, semble être un bon moyen de juger de leur maîtrise des concepts associés, autant que du concept de réaction chimique en lui-même. Pour cela, nous avons utilisé une technique rarement appliquée à la recherche en didactique de la chimie : la technique du « slowmation ». Celle-ci permet, à partir de photos alignées, de créer un film de courte durée d'aimants en mouvement, symbolisant des entités microscopiques. L'analyse de ces représentations dynamiques de la réaction chimique, réalisées par des élèves de l'enseignement secondaire en FWB (grades 9 à 12 pour un total de 93 élèves formant 43 groupes qui ont réalisés 233 vidéos) a permis de mettre en lumière différentes conceptions des élèves concernant la réaction chimique.

Nous avons pu définir une typologie des collisions et des structures géométriques des produits de réaction. Nous avons observé deux catégories de mécanismes d'interprétation additive possibles et la présence d'interprétations de type agent/action/patient dans les vidéos des élèves. De plus, nous avons remarqué que peu d'élèves prennent en compte les états de la matière dans une production de vidéos dynamiques. Ils ne réalisent également pas spontanément une représentation multi-particulaire (avec un nombre de particules supérieur au coefficient stœchiométrique indiqué dans l'équation) et une réaction en quantité non stœchiométrique (avec excès). Ensuite, nous avons pu remarquer que lorsqu'une réaction n'était pas pondérée et sans indication, plus de 20 % des élèves ne pensaient pas à pondérer l'équation. Cet oubli a des conséquences importantes sur le mécanisme réactionnel proposé.

Mémoire de master en Sciences chimiques
Janvier 2019

Promoteur : P. Snauwaert

Table des matières

1. Introduction.....	4
2. Prescrits de l'enseignement secondaire belge en Fédération Wallonie-Bruxelles.....	5
3. Cadres théoriques.....	9
3.1. Modèle du « chemistry triplet ».....	9
3.2. Modèle des niveaux de significations.....	11
3.3. Modèle particulière vs modèle atomique.....	14
4. Le slowmation.....	15
5. Conceptions erronées de la réaction chimique.....	17
5.1. Interprétation additive.....	17
5.2. Interprétation de type agent/action/patient	18
5.3. Les collisions	18
5.4. Confusion entre indice et coefficient stœchiométrique	19
5.5. Réaction stœchiométrique et non stœchiométrique.....	20
6. Questions de recherche	21
7. Méthodologie	22
7.1. Choix des équations de réaction	22
7.2. Choix de l'application	23
7.3. Méthodologie du pré-test avec des étudiants d'AESS chimie.....	23
7.4. Méthodologie du test auprès des élèves de l'enseignement secondaire	25
8. Présentation et analyse des résultats du pré-test des étudiants en AESS chimie	27
8.1. Sélection de nouvelles tâches	27
8.2. Création d'une grille d'analyse provisoire	28
8.3. Choix de l'application et des équations	31
9. Présentation et analyse des résultats des tests réalisés dans l'enseignement secondaire ..	33
9.1. Les collisions	33
9.2. Interprétation additive.....	37

9.3.	Mouvement des particules	40
9.3.1.	Interprétation de type agent/action/patient	40
9.3.2.	Etats de la matière	43
9.4.	Formule brute et structure des produits	45
9.4.1.	La pondération.....	45
9.4.2.	Les formules brutes	47
9.4.3.	Représentation géométrique des produits	51
9.5.	Prédiction de produits et de réactifs	57
9.6.	Mono-particulaire et multi-particulaire	60
10.	Conclusions	63
11.	Références	66

1. Introduction

Le concept de réaction chimique occupe une grande place en chimie mais également en biologie ou encore en physique. Ce concept n'est pas seulement présent dans l'enseignement secondaire en FWB dès la troisième année, il est présent dans le quotidien du chimiste mais est également dans la société. Il est intéressant de noter que connaître les bases du concept de réaction chimique permet d'être « un bon citoyen ». Cela signifie avoir un esprit critique sur les mécanismes réels des produits qui sont vendus à grands coups d'arguments et de slogans, comme par exemple les déboucheurs d'évier, les produits dissolvants « miracle », etc.

Ce concept de réaction chimique, pourtant fréquemment abordé dans le cursus entier, pose de nombreux problèmes aux élèves en apprentissage. Ils ont des difficultés à se faire une idée de la définition même d'une réaction chimique. La visualisation au niveau microscopique de ce concept est également un frein à leur apprentissage. Cependant, même si les élèves ont des difficultés à se représenter la réaction chimique, ils se créent pourtant une image de ce procédé. Il est donc intéressant de pouvoir avoir accès à toutes ces représentations, dont les implications pour la compréhension des concepts ultérieurs sont nombreuses.

Dans ce mémoire, nous abordons tout d'abord les prescrits de l'enseignement général en Fédération Wallonie-Bruxelles (FWB). Nous passons ensuite à l'étude des trois cadres théoriques et du dispositif expérimental que nous avons utilisé. Nous faisons un résumé de la littérature scientifique concernant les conceptions erronées de la réaction chimique qu'ont les élèves de l'enseignement secondaire. Sur base de ces informations, nous nous posons deux questions de recherche portant sur les représentations de la réaction chimique. Nous vous présentons ensuite le dispositif de recherche (en fonction des différents publics ciblés). Nous terminerons par la présentation et la discussion des résultats obtenus. Une conclusion clôturera, bien sûr, ce travail.

Nous vous souhaitons une excellente lecture.

2. Prescrits de l'enseignement secondaire belge en Fédération Wallonie-Bruxelles

L'introduction aux réactions chimiques et donc aux équations chimiques commence dans l'enseignement secondaire en FWB à partir de la 3^{ème} année (grade 9). Au fur et à mesure des années, de nouvelles notions viennent enrichir ce concept et ses représentations symboliques.

Dans cette section vous sont présentées les connaissances à acquérir sur la réaction chimique dans le cursus du secondaire selon le référentiel officiel en Fédération Wallonie-Bruxelles (FWB, 2014). Il est commun à tous les réseaux¹ et constitue la base pour la création des programmes. Ceux-ci sont propres à chaque réseau et sont utilisés par les professeurs de terrain comme orientation méthodologique pour la préparation des cours. Nous nous sommes limités à l'étude des référentiels dans le cas de l'enseignement général². Cela permet de garantir une vue plus globale des acquis attendus des élèves, le référentiel étant valable pour les différents réseaux d'enseignement en Belgique francophone. Le tableau 1 reprend les connaissances à acquérir en secondaire et permet de voir la comparaison des prescrits entre les élèves en sciences générales (5 périodes³ de sciences par semaine) et en sciences de base (3 périodes de sciences par semaine).

Les élèves de 3^{ème} secondaire commencent par la première unité d'acquis d'apprentissage⁴ (UAA) nommée « constitution et classification de la matière ». Ils disposent donc d'un certain nombre de prérequis avant d'aborder pour la première fois les équations chimiques (dans l'UAA 2) : les définitions des corps purs (des corps purs simples et des corps purs composés) et des mélanges, l'électronégativité, les noms et la structure subatomique des atomes et la composition atomique d'une molécule. Ils ont également un premier contact avec le tableau périodique des éléments.

La seconde UAA, appelée « la réaction chimique : approche qualitative » mentionne, pour la première fois, le concept d'équation chimique. À la fin de cette UAA, les élèves sont théoriquement capables de différencier les produits des réactifs dans une équation chimique et de différencier un mélange (juxtaposition de substances sans transformation), une transformation chimique (observation empirique d'un phénomène chimique) et une réaction

¹ L'enseignement en Belgique francophone est structuré en trois réseaux : le réseau officiel de la Fédération Wallonie-Bruxelles, le réseau officiel subventionné et le réseau libre subventionné.

² Quatre types d'enseignement secondaire : général, technique, professionnel et formation en alternance

³ 1 période = 50 min de cours

⁴ L'unité d'acquis d'apprentissage désigne « un ensemble cohérent d'acquis d'apprentissage susceptible d'être évalué ». Les acquis d'apprentissage désignent « ce qu'un élève sait, comprend, est capable de réaliser au terme d'un processus d'apprentissage ». (FWB, 2014)

chimique (interprétation moléculaire, ionique, etc., d'un phénomène chimique). Ils ont également vu comment pondérer⁵ une équation chimique et faire la différence entre un indice et un coefficient stœchiométrique.

En 4^{ème} année (grade 10) dans l'UAA 3, les élèves définissent la quantité de matière et le nombre d'Avogadro, voient la loi de Lavoisier et résolvent des problèmes stœchiométriques. En sciences générales, ils terminent cette unité d'acquis d'apprentissage, (appelée « la réaction chimique : approche quantitative »), sur les notions de réactifs en excès et en défaut.

Les différents types de liaisons chimiques leur sont enseignés dans le courant de la cinquième année de secondaire lors de l'UAA 5, appelée « liaisons chimiques et configuration spatiale des espèces chimiques ». C'est également cette année-là que la thermochimie est introduite en sciences générales dans l'UAA 6. Cela comprend donc, entre autres, la notion d'énergie de liaison, ce qui clarifie quelque peu la rupture de liaisons lors d'une réaction chimique. L'UAA 7 comprend les réactions menant à un état d'équilibre dynamique.

Lors de la dernière année de l'enseignement secondaire, les concepts principaux reliés à l'apprentissage de la réaction chimique se retrouvent dans l'UAA 10. Cette dernière regroupe les concepts de réaction acido-basique (transfert de protons H^+) et d'oxydo-réduction (transfert d'électrons e^-).

	Sciences générales – deuxième degré – troisième année	Sciences de base – deuxième degré – troisième année
UAA 1	« Constitution et classification de la matière » - Objets macroscopiques • Corps pur, simple, composé • Mélange • Élément - Objets microscopiques • Espèce chimique • Molécule • Atome • Ion, cation, anion • Charge, proton, neutron, électron - Atomes, éléments, familles • Symbolisation • Nomenclature atomique - Electronégativité	

⁵ Le terme « pondérer » peut être remplacé par équilibrer, ajuster, ... L'ensemble de ces verbes signifie qu'il faut ajouter des coefficients stœchiométriques pour vérifier la conservation de la masse entre réactifs et produits.

UAA 2	« La réaction chimique : approche qualitative » - Phénomène chimique • Transformation chimique • Réaction chimique • Equation chimique - Réactifs, produits - Coefficients stœchiométriques - Indices - Valence et/ou état d'oxydation	
	Sciences générales – deuxième degré – quatrième année	Sciences de base – deuxième degré – quatrième année
UAA 3	« La réaction chimique : approche quantitative » - Loi de Lavoisier - Réactif en excès - Réactif limitant	« La réaction chimique : approche quantitative » - Loi de Lavoisier - Réactif en excès
UAA 4	« Identifier une espèce chimique par une réaction chimique » - Solubilité	« Caractériser un phénomène chimique » - Thermochimie : réactions réversibles et irréversibles, catalyseur, etc.
	Sciences générales – troisième degré – cinquième année	Sciences de base – troisième degré – cinquième année
UAA 5	« Liaisons chimiques et configuration spatiale des espèces chimiques » - Modèle de Lewis - Electron de valence - Liaison ionique - Liaison covalente pure et covalente polarisée - Liaison hydrogène - Liaison métallique	« Les liaisons chimiques » - Modèle de Lewis - Electron de valence - Liaison ionique - Liaison covalente pure et covalente polarisée
UAA 6	« Caractériser un phénomène chimique » - La thermochimie	« Les équilibres chimiques » - Loi de Le Châtelier - Réactions complètes et limitées à un équilibre
UAA 7	« Les équilibres chimiques » - Loi de Le Châtelier - Réactions complètes et limitées à un équilibre	« Notions de base de chimie organique (alcane, polymères, alcènes) » - Chimie organique
UAA 8	« La molécule en chimie organique » - Chimie organique	

	Sciences générales – troisième degré – sixième année	UAA 8 – Sciences de base – troisième degré – sixième année
UAA 9	« <i>La macromolécule en chimie organique</i> » - Structure des protéines	« <i>Grandes classes de réactions chimiques (acide-base, oxydoréduction, précipitation)</i> » - Réactions acide-base • Acide et base de Brönsted • Autoprotolyse de l'eau - Réactions d'oxydo-réduction • Etat d'oxydation
UAA 10	« <i>Les réactions avec transfert : les réactions acide-base et d'oxydoréduction</i> » - Réactions acide-base • Acide et base de Brönsted • Autoprotolyse de l'eau - Réactions d'oxydo-réduction • Etat d'oxydation	

Tableau 1 : Tableau récapitulatif des connaissances vues dans l'enseignement secondaire en sciences générales et en sciences de base en Fédération Wallonie-Bruxelles en lien avec la réaction chimique (FWB, 2014)

On voit que, malgré les concepts enseignés durant ces années, le processus microscopique de la réaction chimique n'a jamais fait l'objet d'un enseignement dédié. Par exemple, les programmes n'incluent pas la représentation de la rupture de liaisons lors d'une réaction chimique. Cependant, il est vrai que les élèves voient certains « mécanismes » très simples comme le transfert d'un H^+ lors de réactions acido-basiques et le transfert d'électrons lors d'une réaction d'oxydo-réduction (représentation d'une pile électrochimique, voir figure 1).

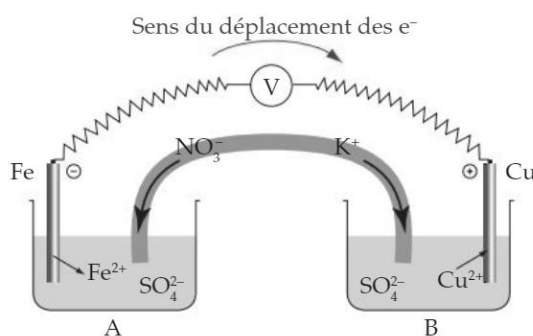


Figure 1 : Représentation d'une pile électrochimique (Pirson et al., 2018)

3. Cadres théoriques

3.1. Modèle du « chemistry triplet »

Dans notre étude, nous prenons appui sur la théorie des niveaux de savoir⁶ de Johnstone (1982). Elle se base sur le fait que l'enseignement-apprentissage de la chimie peut être vu selon trois niveaux de savoir (figure 2) : macroscopique, submicroscopique et symbolique. Nous utiliserons uniquement la version de la théorie des niveaux de savoir datant de 1991 (Johnstone, 1991). D'autres études sur les niveaux de savoirs ont été réalisées sur la base de cette version (Kermen & Méheut, 2009 ; Talanquer, 2010 ; Taber, 2013 ; Dehon, 2018). Ces études sont des versions modifiées de la théorie des niveaux de savoir de Johnstone. Cependant, la version originelle nous semble appropriée pour notre recherche.

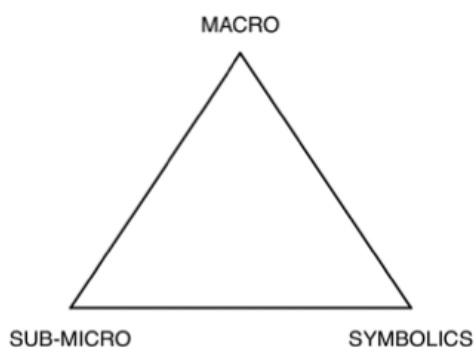


Figure 2 : Représentation graphique du « chemistry triplet » de Johnstone (1991)

Le niveau macroscopique est ce qui peut être vu, touché et senti. Cela comprend tout ce qui peut être expérimenté, observé et décrit à l'aide d'un appareil de mesure. Par exemple, pour caractériser la formation de la rouille du fer du point de vue macroscopique (figure 3), on pourrait décrire sa couleur ou sa texture.



Figure 3 : Image représentant la rouille du fer au niveau macroscopique (ParuVendu, s.d.)

Le niveau submicroscopique est le niveau des représentations iconographiques dans lequel les phénomènes sont expliqués. Il fait partie du monde des modèles. La théorie des particules

⁶ Le terme « niveau de savoirs » change selon les auteurs (dont Johnstone lui-même), il peut être renommé par d'autres termes : « niveau de représentation », « niveau de pensée », etc. (Dehon, 2018).

se situe dans ce niveau de savoir. Par exemple, pour caractériser la formation de la rouille du fer du point de vue submicroscopique (figure 4), on pourrait utiliser un schéma du processus à l'aide de boules représentant les molécules/atomes composant le fer, le dioxygène et l'oxyde de fer (III).

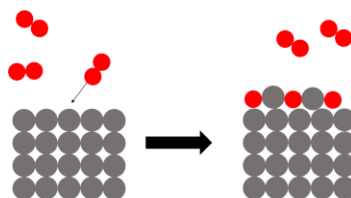
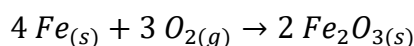


Figure 4 : Représentation du phénomène de formation de la rouille du fer au niveau submicroscopique. Les atomes de fer sont représentés par des cercles gris et les atomes d'oxygène sont représentés par des cercles rouges.

Le niveau symbolique est un niveau dans lequel les signes sont utilisés pour communiquer des concepts et des idées à l'aide de symboles chimiques ou mathématiques. Il comprend donc les formules chimiques, les équations chimiques, les symboles de grandeurs ou d'unités, etc. Par exemple, pour décrire la formation de la rouille du fer d'un point de vue symbolique, on pourrait écrire l'équation bilan du phénomène :



Selon Johnstone, afin de comprendre pleinement la chimie, il est nécessaire de maîtriser chaque niveau de savoir et pouvoir circuler facilement d'un niveau à un autre. Un manque de compréhension des notions à des multiples niveaux de savoir peut engendrer une conception alternative de ces mêmes notions. Cela empêche donc les élèves de mobiliser correctement les différents concepts enseignés. Par exemple, pour comprendre pleinement le phénomène de la rouille du fer, il ne suffit pas de l'observer, le décrire au niveau macroscopique. Il faut également comprendre ce qui se passe au niveau submicroscopique et réussir à retranscrire correctement les équations chimiques impliquées dans la réaction. À partir de ces connaissances, il sera, par exemple, possible pour le chimiste d'empêcher ou de retarder l'oxydation du fer.

Cette circulation entre les différents niveaux est un obstacle majeur pour les élèves. En effet, ils ont plus facilement accès au niveau macroscopique (le monde observable étant la porte d'entrée de tous les phénomènes) et restent donc souvent bloqués à ce niveau. C'est pour cela qu'il faut davantage mettre l'accent sur les niveaux submicroscopique et symbolique afin de réussir à développer chez les élèves la capacité de passer d'un niveau à l'autre. Le niveau

symbolique est d'ailleurs un niveau que les enseignants utilisent beaucoup, de par son omniprésence dans les référentiels en FWB (voir UAA1 et UAA2). Une des raisons de cet usage massif est qu'il est facile de réaliser une grande quantité d'exercices en peu de temps en empruntant massivement au langage symbolique des chimistes (pondération des équations chimiques, construction de formules moléculaires par la méthode du chiasme, exercice de nomenclature à partir de formules chimiques, etc.). Seul le niveau submicroscopique est finalement peu abordé dans l'enseignement en FWB. Par exemple, la théorie des collisions n'est pas enseignée aux élèves ; ils ne voient que des représentations microscopiques très simplifiées des réactions d'oxydo-réduction et des réactions acido-basiques. Cela peut entraîner une lacune dans la représentation mentale de la nature particulière des phénomènes chimiques.

La figure ci-dessous (figure 5) reprend le triangle de Johnstone appliqué à un phénomène chimique, tel que défini en FWB (2014). L'élève peut comprendre ce phénomène selon trois points de vue : au niveau macroscopique, le phénomène chimique est décrit par une « transformation chimique » ; au niveau microscopique, le phénomène chimique est décrit par la « réaction chimique » ; finalement, au niveau symbolique, c'est l'« équation chimique » qui représente le phénomène chimique.

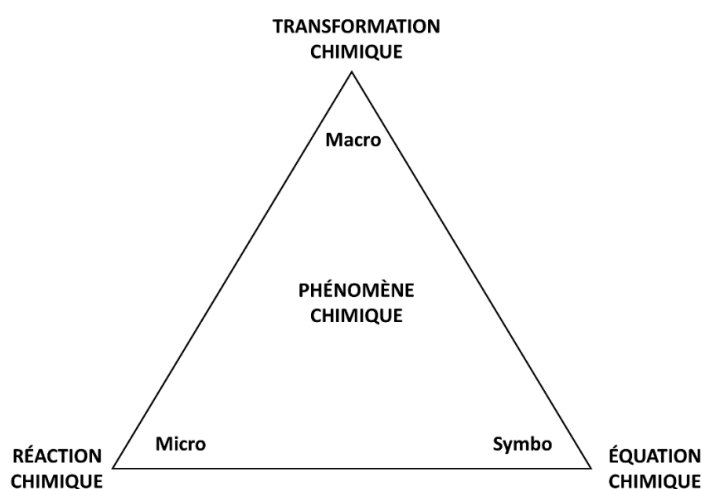


Figure 5 : Représentation d'un phénomène chimique selon le chemistry triplet en FWB.

3.2. Modèle des niveaux de significations

Dans le cadre de cette recherche, nous nous concentrons sur le lien entre le niveau submicroscopique et le niveau symbolique. Un autre modèle, appelé modèle des niveaux de signification (Dehon, 2018), permet de placer les symboles au centre de la démarche. Chaque visualisation (symbole, représentation iconique, dessin, terme) est partiellement connectée à des significations symboliques (référence aux règles d'écriture, à d'autres disciplines, etc.), des

significations microscopiques (référence aux particules subatomiques, aux molécules, aux atomes, etc.), et des significations macroscopiques (référence aux propriétés physiques ou chimiques, aux substances, etc.) (figure 6).

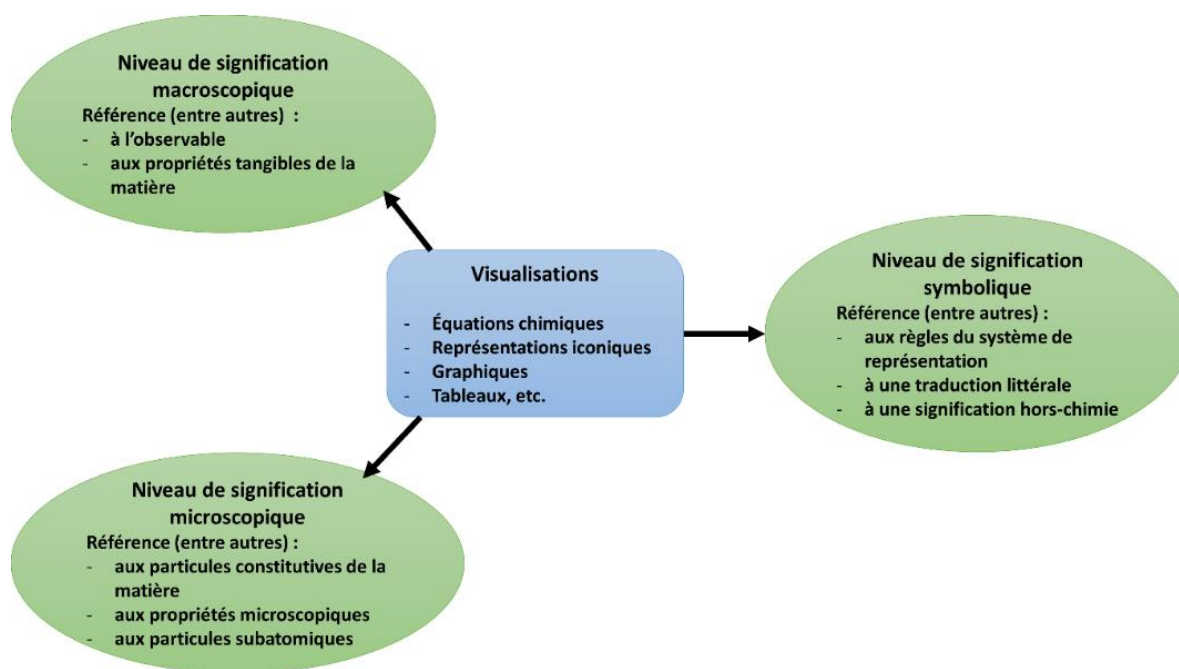


Figure 6 : Principe général du modèle de niveaux de signification (Dehon, 2018)

Le modèle des niveaux de signification permet de mieux comprendre les difficultés des élèves à passer d'un niveau à un autre. Illustrons ce modèle en utilisant le fer (figure 7) :

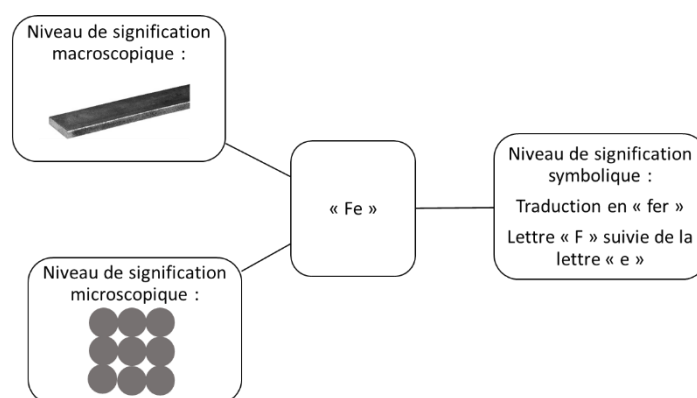


Figure 7 : Schéma du modèle de niveaux de significations dans le cas du symbole « Fe »

Tout d'abord, l'élève peut interpréter le symbole « Fe » au niveau de signification symbolique. Dans ce cas, il peut être compris comme représentant le mot « fer » mais sans réelle signification, comme un simple mot obtenu par traduction. Il peut encore être vu comme une juxtaposition des lettres « F » et « e ». Au niveau de signification microscopique, l'élève

comprend le symbole comme un assemblage d'atomes de fer et il peut être capable de donner la composition subatomique ou certaines propriétés typiques. Au niveau de signification macroscopique, les élèves se représentent le fer comme un objet métallique qui peut être fondu et remodelé, qui rouille, etc.

Ce modèle montre bien la difficulté que peuvent avoir les élèves à passer d'un symbole à des significations voulues par le professeur. Un élève peut en effet savoir traduire « Fe » par le terme « fer », sans en connaître la signification chimique (propriétés chimiques, structure atomique, etc.).

Prenons un autre exemple avec le cas de la réaction chimique (figure 8). Au niveau de signification macroscopique, la réaction chimique peut être comprise comme une réaction entre substances. Au niveau de signification symbolique, l'élève ne comprend pas ce qui se déroule, il utilise donc des mots-refuges (les réactifs réagissent, les réactifs se mélangent, etc.) ou il ne peut voir qu'une addition de termes (via une interprétation mathématique du signe « + »). Au niveau de signification microscopique, ce sont des entités microscopiques qui entrent en réaction. Il est donc important de faire la distinction entre transformation, réaction et équation chimique pour que le concept de « réaction chimique » soit lié au niveau microscopique dans l'esprit des élèves.

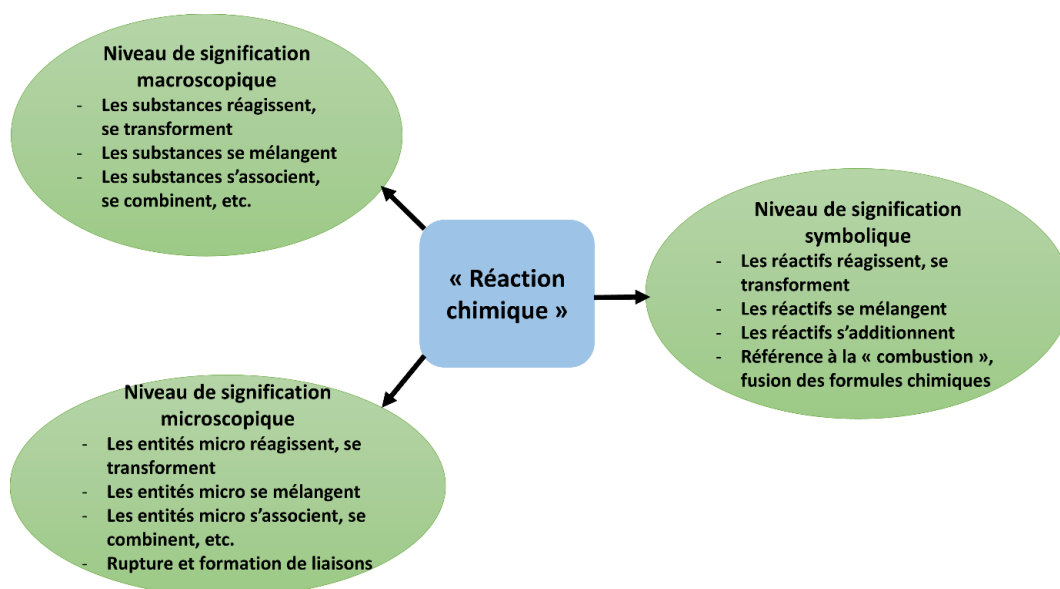


Figure 8 : Schéma des niveaux de signification et exemples de significations associées au terme « réaction chimique » exprimées à partir d'une équation de réaction (Dehon, 2018)

3.3. Modèle particulaire vs modèle atomique

Mais comment représenter, au niveau submicroscopique, la réaction chimique ? Selon Cheng, les molécules et atomes peuvent être représentés selon deux modèles : un modèle particulaire et un modèle atomique (Cheng, 2018).

Dans le modèle particulaire, on représente les atomes sous la forme de sphères, sans prise en compte des électrons, des protons, des neutrons ou des éventuelles liaisons dans une molécule. Dans le modèle atomique, on doit faire la distinction entre entités neutres et entités chargées ; les liaisons peuvent apparaître ainsi que les particules subatomiques (électrons, protons et neutrons). La figure 9 donne un exemple de la différence entre un modèle particulaire et un modèle atomique pour la réaction d'oxydation du fer en oxyde de fer (III).

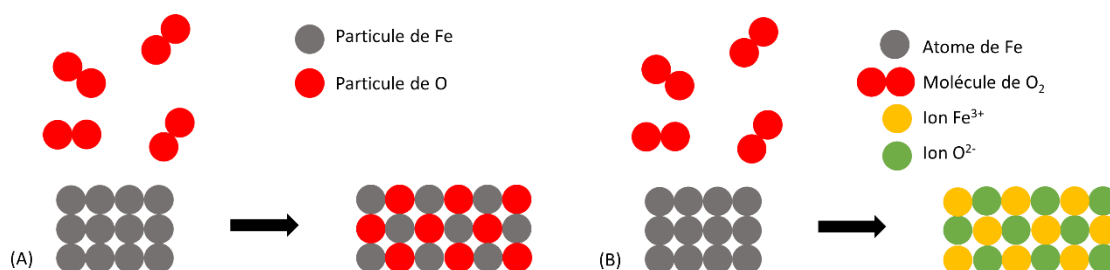


Figure 9 : représentation des modèles particulaire (A) et atomique (B) selon Cheng, pour la réaction d'oxydation du fer en oxyde de fer (III)

Cheng montre dans son étude que le choix des élèves pour une représentation particulaire n'est pas moins pertinent qu'une représentation atomique, jugée pourtant plus sophistiquée par la plupart des enseignants. Le modèle particulaire, malgré sa relative simplicité, permet de représenter de façon correcte et claire beaucoup de concepts importants de chimie telle que la théorie des collisions ou les états de la matière. La représentation iconique est aussi grandement facilitée. Mais il y a un prix à payer pour cette représentation en modèle particulaire. En effet, certaines informations comme la présence d'ions ne sont pas présentes dans la représentation, ce qui peut entraîner certains élèves à penser que la réaction d'oxydation du fer aboutit à un composé covalent.

Nous avons fait le choix, dans le cadre de notre étude, de demander aux élèves de représenter des réactions chimiques avec des modèles particuliers afin de réaliser des vidéos d'animation dynamique de type « slowmation ».

4. Le slowmation

La technique du « slowmation⁷ », ou animation lente, est une technique simple et rapide, introduite par Garry Hoban au début des années 2000 (Hoban, 2005), qui permet de réaliser des vidéos destinées à l'enseignement.

Pour réaliser des vidéos en slowmation, les élèves doivent réaliser des photos d'objets qu'ils positionnent différemment entre chaque photo. À l'aide d'une application ou d'un logiciel, ces photos défilent à une vitesse entre 2 à 10 images par seconde, ce qui donne une impression de mouvement. À cette vidéo peuvent être ajoutés une bande sonore, du texte, de la musique et des diagrammes.

Cette technique vient d'une dérivation du « stopmotion » qui permet de réaliser des vidéos de film d'animation mais avec une vitesse de défilement d'images allant de 25 à 30 images par seconde (Wikipédia, s.d.). Une autre technique similaire permettant de réaliser des films d'animation est le « claymation », utilisée anciennement par Hoban (2005). La particularité de cette technique est que le matériel utilisé est principalement de la plasticine.

Le slowmation est très peu utilisé en recherche dans le domaine de la didactique de la chimie. Cette technique est, par contre, souvent employée pour illustrer des concepts de biologie comme le cycle de vie d'un être vivant (figure 10), la mitose, etc.



Figure 10 : Exemple de film en « slowmation » dans le cas du cycle de vie d'un papillon (KERIM K., 2013)

Elle est également utilisée pour des concepts de physique comme l'électricité statique (figure 11), le cycle lunaire, etc.

⁷ À ne pas confondre avec la technique du « slow motion » qui consiste à diminuer la vitesse de défilement d'image d'une vidéo filmée. (Cambridge dictionary, 2018)

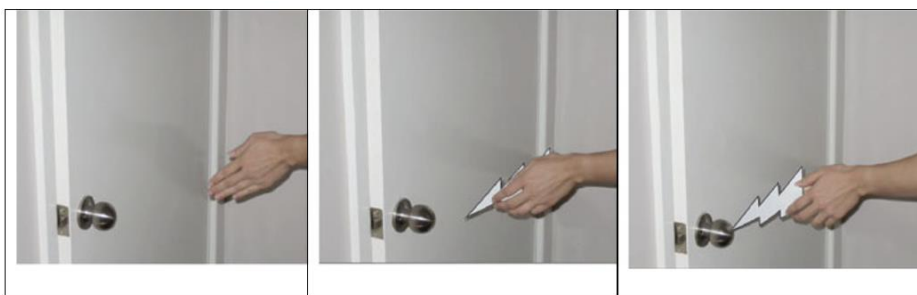


Figure 11 : Exemple de film en « slowmotion » dans le cas de l'explication de l'électricité statique (Hoban & Nielsen, 2012)

Cette technique est principalement utilisée par des futurs instituteurs, et non par des élèves de l'enseignement secondaire. Cependant, des formations sur la technique du slowmotion existent, ce qui explique l'utilisation de ce type de représentation dynamique dans certains établissements scolaires (Action Médias Jeunes, 2016).

Nous espérons donc pouvoir observer les conceptions que les élèves de l'enseignement secondaire mobilisent sur le déroulement d'une réaction chimique du point de vue microscopique.

5. Conceptions erronées de la réaction chimique

Comme nous l'avons vu précédemment, la réaction chimique est un sujet important de l'enseignement-apprentissage de la chimie en FWB. Son apprentissage s'étale sur quatre années d'étude. Ce sujet important pose de nombreux problèmes à l'apprentissage liés à son explicitation très étalée dans le temps (UAA2 pour une première approche, UAA3 pour les problèmes stœchiométriques, UAA5 pour les liaisons chimiques, etc.). De plus, les élèves peuvent avoir de grandes difficultés à comprendre la nature dynamique d'une réaction chimique au niveau microscopique vu que cet aspect est peu enseigné. En l'absence de représentations favorisées par l'enseignement, des conceptions alternatives erronées apparaissent dans l'esprit des élèves.

5.1. Interprétation additive

Cette interprétation est ainsi nommée car les élèves voient la réaction chimique comme une addition de réactifs (Yitbarek, 2011). Il y a deux catégories d'interprétation additive.

Dans la première, les élèves se contentent de coller les réactifs les uns aux autres pour donner les produits. Il n'y a donc pas de rupture de liaisons mais uniquement formation de liaisons. Certaines équations chimiques peuvent renforcer la visualisation d'une interprétation additive. Comme, par exemple, la formation du dioxyde de carbone (figure 12).

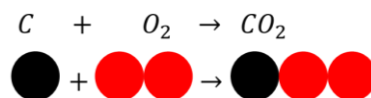


Figure 12 : Représentation additive de la formation du dioxyde de carbone. Les atomes de carbone sont représentés par des cercles noirs et les atomes d'oxygène par des cercles rouges.

Dans ce cas, au niveau de l'écriture de la réaction, on juxtapose les formules chimiques des réactifs pour former le produit (« CO_2 » est formé de « C » juxtaposé à « O_2 »). Cette représentation symbolique est probablement l'un des éléments favorisant l'interprétation additive de la réaction chimique.

Ces élèves considèrent aussi les corps purs composés comme un assemblage de corps purs simples juxtaposés (Mzoughi-Khadhraoui & Dumon, 2012). Le corps pur simple n'est ainsi pas modifié par la réaction chimique : il est facilement récupérable par une méthode de séparation. Dans les cas du « CO_2 », les substances carbone et dioxygène sont considérées comme étant piégées dans le gaz carbonique et libérables par chauffage par exemple.

La deuxième catégorie d'interprétation additive implique la création de nouveaux réactifs ayant une structure similaire aux produits. Les élèves forment des intermédiaires hypothétiques composés d'un même type d'atomes (Kam-Wah Lee, 1999). Par exemple, pour certains élèves, la formation de Fe_2O_3 implique des molécules hypothétiques de O_3 et Fe_2 dans les réactifs (figure 13).

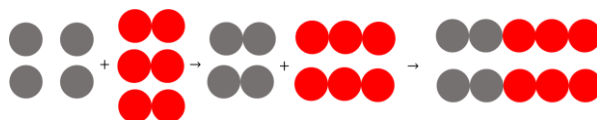


Figure 13 : Représentation additive de la formation de l'oxyde de fer (III). Les atomes de fer sont représentés par des cercles gris et les atomes d'oxygène par des cercles rouges.

Ces molécules hypothétiques sont une décomposition en corps purs simples de la formule brute du produit, via un raisonnement identique à la première catégorie d'interprétation additive.

5.2. Interprétation de type agent/action/patient

Cette interprétation induit la présence d'une substance active, appelé l'agent, qui « attaque » une autre substance inactive, appelé le patient, pour former le produit (Solomonidou & Stavridou, 1994 ; Gauchon, 2005). Le réactif patient ne bouge pas du tout durant toute la durée de la réaction et le réactif agent est donc l'instigateur de la réaction. Cette représentation est fréquente dans le vocabulaire du chimiste : transfert de H^+ de l'acide vers la base, attaque d'un nucléophile sur un électrophile, etc.

Cette vision d'agent/action/patient empêche les apprenants d'appréhender l'ensemble des réactions. Par exemple, si deux substances sont catégorisées comme « patient » dans des réactions, il leur est difficile de concevoir que ces deux molécules réagissent ensemble dans une troisième réaction (exemple : le fer et le soufre).

5.3. Les collisions

Les collisions sont nécessaires à la rupture de liaisons dans la plupart des réactions chimiques. Par collisions, nous entendons qu'un contact, un choc, a lieu entre les réactifs et que ce contact entraîne la formation de nouvelles liaisons. De nombreux élèves ne considèrent pas que les collisions soient nécessaires à la rupture des liaisons dans les réactions chimiques (Kam-Wah Lee, 1999) : ils envisagent des ruptures de liaisons spontanées (figure 14).

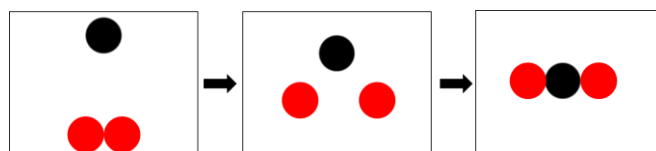
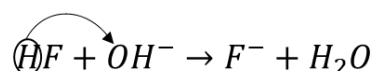


Figure 14 : Représentation de la réaction de formation du dioxyde de carbone avec une rupture de liaison spontanée de la molécule de dioxygène. Les atomes de carbone sont représentés par un cercle noir et les atomes d'oxygène par des cercles rouges.

Cette interprétation est renforcée par l'écriture d'une équation d'oxydation de type :



L'électron semble partir sans influence extérieure. Une autre écriture renforce cette vision de la collision, lorsqu'on décrit le transfert d'un H^{+} dans une réaction acido-basique :



Cette représentation donne l'impression que le H^{+} se détache de lui-même de la molécule d'acide fluorhydrique pour attaquer la base⁸.

5.4. Confusion entre indice et coefficient stœchiométrique

La confusion entre les indices et les coefficients dans une équation chimique entraîne une compréhension erronée de la réaction chimique (Mzoughi-Khadhraoui & Dumon, 2012). Par exemple, deux écritures comme « $3 O_2$ » (3 molécules de dioxygène) et « $2 O_3$ » (2 molécules d'ozone) ne véhiculent pas la même information. De plus, le coefficient stœchiométrique présente plusieurs significations potentielles (figure 15) que les élèves doivent sélectionner pertinemment en fonction du contexte (Dehon & Snauwaert, 2015) :

- Par exemple, les élèves peuvent voir le coefficient stœchiométrique comme un simple chiffre dans une équation chimique. Il sert donc uniquement à pondérer l'équation afin de suivre la loi de Lavoisier. Le coefficient stœchiométrique n'est vu dans ce cas que comme un outil mathématique de pondération. Les lacunes des élèves peuvent donc être plus difficiles à voir par les méthodes traditionnelles d'enseignement. En effet, les élèves n'ont pas besoin de comprendre le sens chimique d'une équation pour réussir à réaliser une pondération correcte (Yarroch, 1985 ; Laugier & Dumon, 2000 ; Dehon & Snauwaert, 2015).

⁸ Cette représentation peut également être vue comme le produit d'une interprétation de type agent/action/patient

- Le coefficient peut être vu également comme une quantité de molécules ou d'atomes intervenant dans une réaction chimique. Cela donne aux élèves une vue mono-particulaire (le coefficient est traduit par un nombre strict de molécules ou d'atomes) et non multi-particulaire (le coefficient est traduit comme une proportion) des réactions chimiques. Ils visualisent donc une réaction unique et non une multitude de réactions chimiques survenant en même temps. Ainsi, si dans l'équation, il est noté qu'il y a 2 molécules de HI formées, les élèves ne pensent pas qu'il y a en fait bien plus de 2 molécules formées en fin de réaction.

- Le coefficient stœchiométrique peut être interprété comme étant une quantité de matière initiale. Cela réfère à l'application calculatoire d'une équation chimique dans le cadre d'un problème stœchiométrique.

Or, le coefficient devrait surtout être interprété comme une proportion, un ratio réactionnel entre réactifs et produits, tant au niveau macroscopique que microscopique.

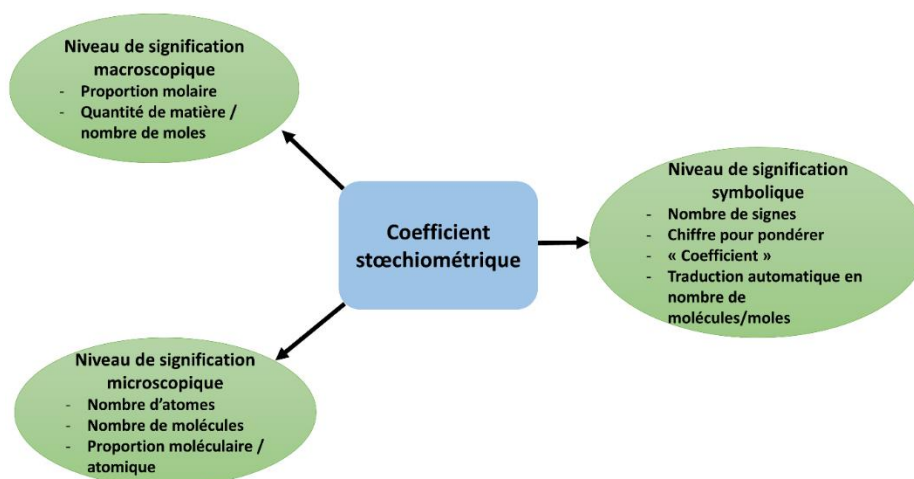


Figure 15 : Schéma des niveaux de signification et exemples de significations associées au coefficient stœchiométrique dans une équation de réaction. (Dehon, 2018)

5.5. Réaction stœchiométrique et non stœchiométrique

Une grande difficulté pour les élèves est de faire la différence entre une réaction en quantité stœchiométrique et une réaction en quantité non-stœchiométrique, et donc, de comprendre la notion de réactif limitant. En effet, dans l'esprit de certains élèves, tous les réactifs doivent réagir dans une réaction chimique (Gauchon, 2005). Cette représentation est nourrie par l'interprétation du coefficient comme une quantité de matière initiale (Stavridou & Solomonidou, 2000) ou un nombre de molécules initial. Dans ces cas (conditions stœchiométriques), il n'y a effectivement pas d'excès : tous les réactifs réagissent.

6. Questions de recherche

Dans le cadre de cette étude, nous nous sommes posés deux questions de recherche :

- Les conceptions erronées de la réaction chimique sont-elles observables dans une activité de type slowmation ?
- Comment des élèves de l'enseignement secondaire se représentent le déroulement dynamique d'une réaction chimique au niveau microscopique de la troisième à la sixième année de l'enseignement secondaire en Fédération Wallonie-Bruxelles ?

7. Méthodologie

L'objectif de cette étude est donc de demander à des élèves de l'enseignement secondaire de représenter ce qu'ils pensent être le déroulement d'une réaction chimique au niveau microscopique, en produisant⁹ une animation dynamique de type slowmation. Une des premières étapes de la recherche a été de choisir des réactions à représenter et de proposer des équations en fonction des acquis des élèves.

7.1. Choix des équations de réaction

Quatre équations chimiques ont été choisies avec différents niveaux de difficulté et sont données dans le tableau 2. À chaque nouvelle réaction, une difficulté liée aux obstacles cités précédemment est ajoutée pour augmenter le niveau de compréhension et de visualisation des concepts qu'implique la réaction chimique.

Équation 1	$C + O_2 \rightarrow CO_2$
Équation 2	$H_2 + I_2 \rightarrow 2 HI$
Équation 3	$4 Al_{(s)} + 3 O_{2(g)} \rightarrow 2 Al_2O_{3(s)}$
Équation 4	$N_{2(g)} + 3 H_{2(g)} \rightarrow ...$

Tableau 2 : Équations chimiques données aux apprenants

L'équation 1 a été choisie afin d'opposer peu d'obstacles à la visualisation et pour familiariser les élèves avec l'application sur tablette (dont nous parlons par la suite). En effet, l'équation 1 est composée uniquement de deux types d'atomes, il n'y a pas de coefficient stœchiométrique supérieur à un, il n'y a pas de symboles d'état de la matière et le produit de la réaction est donné. Avec l'équation 2, on introduit les coefficients stœchiométriques non-unitaires. Dans l'équation 3, on introduit des coefficients stœchiométriques supérieurs à deux et les symboles des états de la matière. À ce stade, pour un élève, il pourra être difficile de faire la différence entre la représentation de 4 atomes d'aluminium, représentant l'état solide ($4 Al_{(s)}$), et la représentation d'une hypothétique molécule constituée de 4 atomes d'aluminium (Al_4) (figure 16).

⁹ Le lien des vidéos cité dans le mémoire est disponible en annexe.



Figure 16 : Représentation microscopique de 4 Al(s) ou de Al₄

La dernière équation proposée (équation 4) reprend tous les obstacles précédents. En plus, il est demandé aux élèves de prédire le produit de la réaction. Cette équation leur est familière, notamment au troisième degré (grades 11 et 12), dans le cadre des réactions incomplètes.

Pour réaliser les 4 vidéos des 4 équations chimiques, deux périodes de cours (2 fois 50 minutes) ont été choisies. Cependant, avant de commencer les tests dans l'enseignement secondaire, nous voulions savoir si le temps imparti était adéquat. De plus, nous voulions savoir si les consignes concernant l'utilisation concrète de l'application (sur tablette) et sur les objectifs de l'étude étaient assez claires pour des élèves de l'enseignement secondaire. Nous avons donc choisi de réaliser un pré-test.

7.2. Choix de l'application

Beaucoup d'applications permettent de réaliser des films en « slowmotion ». Notre choix s'est porté sur l'application disponible sur tablette : « Stop Motion Studio ».

Cette application gratuite permet de réaliser facilement des vidéos de type slowmotion. L'annexe 1 permet d'avoir une explication de l'utilisation rapide de l'application et l'annexe 4 donne une explication plus approfondie sur l'application et ses différentes fonctionnalités.

7.3. Méthodologie du pré-test avec des étudiants d'AESS chimie

Afin de juger de la faisabilité technique (durée, mise en œuvre par les apprenants) et de la pertinence de certains choix (pertinences des équations, ergonomie de l'application « Stop Motion Studio »), un test a été organisé le 26 mars 2018 auprès d'étudiants suivant des cours pour obtenir leur agrégation de l'enseignement secondaire supérieur (AESS chimie) à l'Université de Namur. Ces étudiants nous permettent d'avoir accès à un avis didactique sur le dispositif et sur l'activité. De plus, l'enseignant de la classe d'AESS chimie à l'Université de Namur était très intéressé par le dispositif et voulait le partager avec ses étudiants pour qu'ils puissent l'utiliser dans leurs futures classes.

Ce groupe était composé de 11 étudiants âgés de 25 à 48 ans. Toutes ces personnes ont obtenu un diplôme en sciences et certains présentent une expérience professionnelle (dans le secteur privé et/ou dans l'enseignement). Voici une liste des différents diplômes des étudiants volontaires : Master en sciences de l'ingénieur industriel en agronomie (bioingénieur); Master

en sciences géologiques; Doctorat en sciences chimiques (2^{ème} licence); Master en sciences biomédicales; Master en sciences pharmaceutiques; Licence en toxicologie industrielle.

Les 11 volontaires se sont répartis selon leur choix en 5 groupes : 4 groupes de deux personnes et 1 groupe de trois personnes. Ces différents groupes¹⁰, se sont dispersés le plus possible dans le local. L'espace étant limité et comme ils étaient libres de leurs mouvements, des interactions entre groupes différents ont eu lieu. Les étudiants ont réalisé des photos, à l'aide de l'application « Stop Motion Studio » installé sur des tablettes, afin de décrire le déroulement des réactions chimiques. L'application génère une courte vidéo à partir des photos prises.

Ils ont réalisé 5 films de 5 secondes à partir d'équations de réaction données (tableau 2) pendant 2 périodes de cours. Les vidéos sont lues à une vitesse de 5 frames/sec, ce qui signifie qu'ils devaient faire au moins 25 photos par réaction chimique. Les équations sont données progressivement durant l'activité.

Afin de réaliser ces vidéos, tous les étudiants disposent du même matériel. Ils ont à leur disposition :

- ✓ Une trentaine d'aimants, représentant chacun un atome, de cinq couleurs différentes (figure 17).



Figure 17 : Photographie d'une boîte d'aimants mise à la disposition des élèves

- ✓ Un tableau blanc magnétique déposé horizontalement sur une table (figure 18).

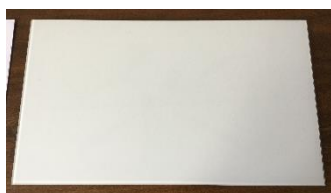


Figure 18 : Photographie d'un tableau mis à la disposition des élèves

- ✓ Une feuille de consignes (voir annexe 1), une feuille de brouillon (annexe 3) et une feuille vierge de description des vidéos (voir annexe 2). En effet, nous leur avons demandé d'écrire un résumé des mouvements qu'ils souhaitaient représenter du

¹⁰ Nommés AEES.G1, AEES.G2, AEES.G3, AEES.G4 et AEES.G5, dans la suite de cet ouvrage.

point de vue microscopique. Cela nous permet de confronter ce qu'ils ont représenté à ce qu'ils avaient l'intention de réaliser.

- ✓ Une tablette placée sur un support (figure 19).



Figure 19 : Photographie de la tablette avec l'application « Stop Motion Studio » fournie aux élèves

La figure 20 donne un aperçu du dispositif global.



Figure 20 : Photographie du dispositif utilisé pour les tests (tablette, aimants, tableau, feuilles de consignes et de description)

7.4. Méthodologie du test auprès des élèves de l'enseignement secondaire

L'étude a été réalisée avec la participation de cinq écoles secondaires de Namur et de ses environs, pour des élèves allant de la troisième à la sixième secondaire (voir tableau 3). Leur professeur de sciences était présent mais ne devait pas intervenir dans la réalisation de leurs vidéos. La méthodologie et le matériel ont été adaptés en fonction des résultats du pré-test auprès des étudiants d'AESS chimie, présentés dans la section suivante.

Nous avons commencé les tests dans l'enseignement secondaire par les élèves en fin de troisième année car nous voulions nous concentrer sur les toutes premières visualisations de la réaction chimique. Ensuite, nous avons voulu voir comment cette visualisation de la réaction chimique évoluait en fonction de la matière assimilée par les élèves. Nous avons donc réalisé

des tests supplémentaires l'année scolaire suivante avec des élèves de cinquième et sixième secondaire.

Plusieurs écoles ont accepté de réaliser ces tests. Ces écoles ont été choisies car elles étaient faciles d'accès et parce que nous connaissions les différents professeurs de sciences. Ces écoles font partie soit du réseau de la FWB, soit du réseau libre subventionné. Ces 2 réseaux reprennent la majorité des élèves du secondaire en Belgique francophone (Wallonie-Bruxelles, 2016). Il était intéressant de réaliser des tests dans les deux réseaux principaux afin d'embrasser des pratiques enseignantes variées.

Nous avons également fait le choix de ne pas nous cantonner à une seule école et à une seule classe. Il était intéressant de ne pas analyser uniquement l'enseignement d'un seul professeur mais d'avoir une vue plus large. Ainsi, cette étude exploratoire n'est pas une critique de l'enseignement des professeurs mais plutôt une observation des représentations possibles de la réaction chimique au niveau microscopique, que peuvent avoir une sélection d'élèves de l'enseignement secondaire.

Date	Année scolaire	École	Section	Nombre d'élèves (nombre de groupes)
26/03	2017-2018	Université de Namur	AESS	11 (5)
18/04	2017-2018	École 1	3 ^{ème} secondaire en technique science	7 (3)
20/04	2017-2018	École 2	3 ^{ème} secondaire en technique science	6 (3)
27/04	2017-2018	École 3	3 ^{ème} général	12 (6)
18/05	2017-2018	École 3	3 ^{ème} général	11 (5)
05/10	2018-2019	École 4	6 ^{ème} général	10 (5)
10/10	2018-2019	École 5	5 ^{ème} général	18 (8)
25/10	2018-2019	École 5	6 ^{ème} général	17 (8)

Tableau 3 : Tableau représentant l'ensemble des écoles visitées avec la section, la date, l'année académique, le nombre d'élèves et le nombre de groupes.

8. Présentation et analyse des résultats du pré-test des étudiants en AESS chimie

8.1. Sélection de nouvelles tâches

Après avoir réalisé le test avec les enseignants en formation, il s'est avéré nécessaire d'ajouter d'autres équations car l'activité était trop courte pour les deux périodes de cours choisies. En effet, les étudiants avaient fini de représenter toutes les réactions en un peu plus d'une heure. Une cinquième équation, appelée « Défi », leur a donc été donnée comme activité supplémentaire¹¹.

Nous avons fait l'hypothèse que des élèves du secondaire réaliseraient les vidéos au même rythme que les étudiants d'AESS chimie. En effet, les jeunes ont de plus grande facilité avec la prise en main d'une technologie plus récente (tablette, traitement de photos, etc.). De plus, leurs connaissances en sciences étant moins grandes que les enseignants en formation, ils doivent faire appel à moins de principes, ce qui génère moins de temps consacré à un éventuel arbitrage, pour réaliser les vidéos. Seule la discussion au sein des groupes pourrait, nous semble-t-il, ralentir la réalisation de l'activité.

Quatre équations « Défi » ont été sélectionnées et ajoutées aux activités (tableau 4).

Défi 1	$S_{(s)} + O_{2(g)} \rightarrow SO_{3(l)}$
Défi 2	$H_{2(g)} + O_{2(g)} \rightarrow \dots$
	Représenter à l'état initial 4 molécules de dihydrogène et 4 molécules de dioxygène
Défi 3	$\dots + \dots \rightarrow Fe_2O_{3(s)}$
Défi 4	$CH_4 + 2 O_2 \rightarrow CO_2 + 2 \dots$

Tableau 4 : Équations « Défi » ajoutées aux équations 1 à 4 dans notre activité slowmotion.

Le Défi 1 a été choisi car il permet de savoir si la pondération est une démarche acquise et instinctive chez les élèves. Le Défi 2 est une équation à laquelle les élèves ont été confrontés à de nombreuses reprises dans leur cursus. En effet, l'équation de formation de l'eau (et surtout sa réaction inverse : l'électrolyse de l'eau) est l'une des premières équations présentées aux élèves de l'enseignement secondaire. On leur impose également des quantités initiales de

¹¹ Les vidéos de ce Défi ($CH_4 + \dots O_2 \rightarrow \dots + \dots$) n'ont pas été analysées car cette équation ne pouvait pas être donnée telle quelle aux élèves du secondaire.

molécules. Cette contrainte a un intérêt double. Tout d'abord, cela les oblige à voir l'équation chimique de manière multi-particulaire (le coefficient n'indique pas un nombre de molécules ou d'atomes initial). Ensuite, elle introduit la notion de réactif limitant, une notion qui est abordée dans l'UAA 3 en quatrième année. Le Défi 3 implique la prédiction des réactifs à partir du produit de réaction. Cette équation a été choisie car elle est construite exactement de la même façon que l'équation 3 ($4 Al_{(s)} + 3 O_{2(g)} \rightarrow 2 Al_2O_{3(s)}$) et qu'elle permet de juger de la production d'intermédiaires hybrides par les élèves¹². Le dernier Défi est une équation plus complexe qui contient deux produits différents et trois types d'atomes, ce qui n'était pas le cas des autres équations.

8.2. Création d'une grille d'analyse provisoire

Après l'étude des vidéos produites par les étudiants en AESS chimie, nous avons relevé et développé trois critères d'analyse majeurs :

Critère 1 : Rupture et formation de liaisons

Nous avons pu constater trois types de collisions possibles, entraînant la rupture et la formation de liaisons :

- Synchronisée : la rupture et la formation de liaisons sont quasi simultanées (figure 21). La collision des particules est donc bien responsable de la rupture des liaisons dans les réactifs et la formation de liaisons pour créer les produits.



Figure 21 : Représentation de la collision synchronisée (AESS.G5.E2). Les paires d'aimants rouges et oranges ne se séparent pas avant d'entrer en collision

- Décalée : la rupture des liaisons dans les réactifs survient avant la collision (figure 22). Lorsque les réactifs se rapprochent les uns des autres, il y a rupture progressive des liaisons. Ensuite surviennent la collision et la formation de liaisons des produits.

¹² En effet, lors d'une interprétation additive, les élèves peuvent créer des intermédiaires hypothétiques en lien avec la formule brute du produit. Dans ce cas, il serait possible de voir l'apparition des réactifs « Fe_2 » et « O_3 ».



Figure 22 : Représentation de la collision décalée (AESS.G2.E2). Les couples d'aimants verts et blancs se séparent avant d'entrer en collision.

- Via dispersion : le contact entre particules provoque la rupture des liaisons des réactifs et une dispersion des atomes. Les atomes dispersés peuvent ensuite entrer en collision et former les produits (figure 23). Cette vision de la collision est due à une interprétation emphatique de la théorie des collisions.

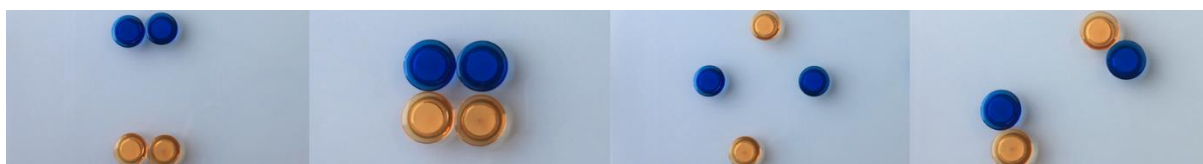


Figure 23 : Représentation de la collision via dispersion (AESS.G4.E2). Les aimants oranges et bleus sont projetés après la collision puis se rejoignent pour former les produits.

Majoritairement, le profil des groupes est cohérent : la visualisation de la collision est presque toujours la même quelle que soit l'équation. Deux groupes (AESS.G1 et AESS.G2) représentent des collisions décalées, deux autres groupes (AESS.G3 et AESS.G5) choisissent les collisions synchronisées et le dernier (AESS.G4) représente les collisions via dispersion.

Critère 2 : Le mouvement des entités

De manière générale, trois catégories de mouvements ont été repérées : translation, rotation et absence de mouvement. Ces catégories sont souvent associées au type d'état. Par exemple, les étudiants rendent compte de l'état solide d'une substance en maintenant les entités immobiles et/ou en multipliant les atomes représentés. L'état gazeux, par contre, implique le plus souvent un mouvement des particules.

Dans ce cas, nous avons fait plusieurs observations grâce aux productions des étudiants d'AESS chimie. Tout d'abord, ils ont représenté l'état solide de deux manières. Soit en représentant les atomes de façon compacte, soit en les représentant de façon non compacte, avec un espace entre chaque aimant. La figure 24, reprend les deux possibilités.

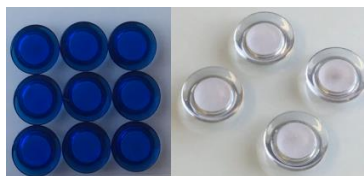


Figure 24 : Représentation de l'aluminium en bloc compact en bleu (AESS.G4.E3) et en bloc non compact en blanc (AESS.G1.E3)

Ensuite, nous avons pu observer une interprétation de type agent/action/patient dans le cas de l'équation 4 ($N_{2(g)} + 3 H_{2(g)} \rightarrow \dots$). Dans les vidéos visées, les molécules de dihydrogène (les agents) attaquent les molécules de diazote (les patients), qui n'ont pas de mouvement de translation. Il est probable que cette interprétation de type « agent/action/patient », qui n'est pas présente dans les autres équations, soit due au grand nombre de molécules impliquées dans cette réaction. En effet, il est long et difficile de réaliser le mouvement d'autant de particules en même temps. Par contre, la raison du choix systématique de l'hydrogène comme agent reste inconnue.

Critère 3 : Nombre de particules et excès

Ce critère d'analyse comprend quatre possibilités de représentation : mono-particulaire ou multi-particulaire avec réactifs sans excès et mono- ou multi-particulaire avec un réactif en excès.

Dans une représentation mono-particulaire sans excès d'une réaction chimique, le coefficient est traduit par un nombre strict de molécules ou d'atomes (figure 25a). Par exemple, dans le cas de l'équation 3 ($4 Al + 3 O_2 \rightarrow 2 Al_2O_3$), les apprenants représentent quatre atomes d'aluminium et trois molécules de dioxygène qui réagissent pour former deux molécules d'alumine.

Lors d'une représentation mono-particulaire avec un excès, le coefficient est traduit par un nombre strict de molécules ou d'atomes qui réagissent. En d'autres termes, il peut y avoir un excès de réactif mais une seule réaction est représentée (figure 25b). Par exemple, dans le cas de l'équation 3 ($4 Al + 3 O_2 \rightarrow 2 Al_2O_3$), les élèves peuvent représenter neuf atomes d'aluminium qui réagissent avec trois molécules de dioxygène pour former deux molécules d'alumine et un excès de 5 atomes d'aluminium.

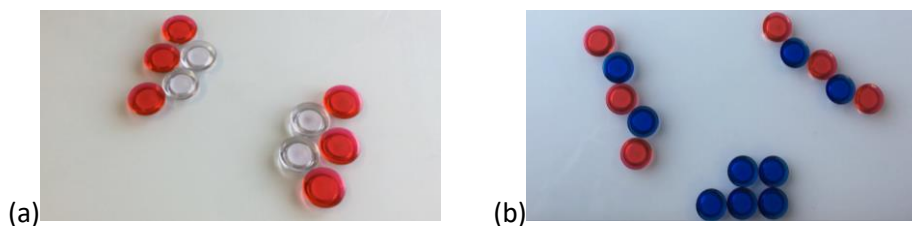


Figure 25 : Représentation mono-particulaire (a) sans excès (AESS.G1.E3) et (b) avec un excès (AESS.G4.E3)

Dans une représentation multi-particulaire, le coefficient est compris comme une proportion (figure 26). Dans le cas de l'équation 1 ($C + O_2 \rightarrow CO_2$), il peut y avoir cinq atomes de carbone qui réagissent avec cinq molécules de dioxygène.



Figure 26 : Représentation multi-particulaire de l'équation 1 (AESS.G4.E1)

La représentation mono-particulaire a été réalisée dans trois quart des vidéos quand un quart des vidéos représentaient une réaction multi-particulaire. Le choix entre mono- ou multi-particulaire est variable pour les deux premières équations. Par contre, pour les équations 3 et 4 où les coefficients stœchiométriques sont supérieurs à 2, la représentation mono-particulaire est unanime. La réalisation de vidéos slowmotion semble probablement trop fastidieuse lorsqu'il y a trop de particules à faire mouvoir, d'où le choix systématique d'un nombre minimal de particules à représenter.

Dans le cas du choix entre réaliser une réaction en quantité stœchiométrique ou non, trois quarts des vidéos ne représentent pas d'excès et un quart des vidéos représentent un réactif en excès. Majoritairement, la représentation d'un excès survient lorsqu'un des réactifs est à l'état solide. La représentation d'un solide en « bloc » multi-particulaire permet de façon simple et sans complication supplémentaire (bouger d'autres objets que le nombre minimal) de réaliser un excès.

8.3. Choix de l'application et des équations

Ce pré-test nous a permis de voir que l'application « Stop Motion Studio » permet de réaliser assez rapidement et facilement des vidéos de réactions chimiques de type slowmotion. Le seul problème que nous avons pu observer est la difficulté de réaliser les vidéos lorsqu'il y

a beaucoup d'objets à faire bouger en même temps. Ce problème peut engendrer de nouvelles conceptions erronées lors de la réalisation des vidéos. Nous discuterons d'un cas lors de la présentation du critère 2 de la grille d'analyse.

De plus, nous avons pu voir que les équations que nous avons choisies pour la réalisation des vidéos permettent de générer différentes visualisations de la réaction chimique et (déjà) différentes conceptions erronées du déroulement de ces réactions (typologie des collisions, interprétation de type agent/action/patient, etc.).

9. Présentation et analyse des résultats des tests réalisés dans l'enseignement secondaire

Le tableau 5 présente le nombre de vidéos réalisées par les élèves de l'enseignement secondaire en fonction de l'année et de l'équation représentée. Il indique également la notation spécifique des vidéos recueillies. Par exemple, la vidéo réalisée par le groupe 4 des élèves de cinquième année dans le cas de l'équation 3 se nommera : 5.G4.E3.

Nombre de vidéos	Troisième (3.G1→3.G17)	Cinquième (5.G1→5.G8)	Sixième (6.G1→6.G13)	Total
Total	105	49	79	233
Équation 1 (E1)	17	8	13	38
Équation 2 (E2)	17	8	13	38
Équation 3 (E3)	17	8	13	38
Équation 4 (E4)	17	8	11	36
Défi 1 (D1)	17	8	9	34
Défi 2 (D2)	15	6	8	29
Défi 3 (D3)	4	2	6	12
Défi 4 (D4)	1	1	6	8

Tableau 5 : Tableau représentant le nombre total de vidéos et par équation réalisées par les élèves de troisième, cinquième et sixième année

Nous utiliserons des fréquences relatives pour pouvoir comparer les données même si, dans certains cas, nous avons un nombre restreint de vidéos recueillies.

9.1. Les collisions

L'analyse des vidéos des élèves de l'enseignement secondaire a permis d'observer d'autres types de collisions. Nous avons gardé la définition de la collision synchronisée utilisée lors du pré-test et redéfini la collision décalée en deux types distincts. Nous avons aussi défini la collision sans rupture de liaisons :

- Synchronisée : la rupture et la formation de liaisons sont quasi simultanées. La collision des particules est donc bien responsable de la rupture des liaisons dans les réactifs et la formation de liaisons pour former les produits.
- Décalée de type I : la rupture des liaisons dans les réactifs survient avant la collision. Lorsque les réactifs se rapprochent les uns des autres, il y a rupture progressive des liaisons. Ensuite surviennent la collision et la formation de liaison des produits.

- Décalée de type II : la collision entraîne la formation de liaisons. Puis des liaisons se rompent pour accéder à une structure géométrique particulière (figure 27).



Figure 27 : Exemple de représentation de la collision décalée de type II (3.G12.E1). Le couple d'aimants blancs se juxtapose à l'aimant bleu pour ensuite glisser autour de celui-ci. Les aimants blancs se séparent lorsqu'ils ont atteint leur position.

- Pas de rupture : il y a collision et formation de nouvelles liaisons mais aucune rupture de liaison n'est observée. Ce type de collision comprend à la fois les représentations additives de la réaction chimique sans rupture de liaisons et les représentations des réactifs en tant que particules dissociées, sans liaisons internes au départ (figure 28).

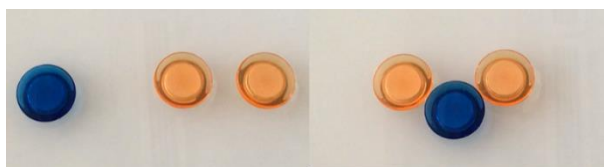


Figure 28 : Exemple de représentation de la collision sans rupture de liaisons (3.G17.E1). Deux atomes d'oxygène (aimants orange) réagissent avec un atome de carbone (aimant bleu).

La figure 29 montre que la représentation de la collision chez les élèves de l'enseignement secondaire, quelle que soit l'année d'étude, est majoritairement une représentation décalée de type I (46%¹³). Viennent ensuite les représentations de la collision sans rupture de liaisons (24% soit 56 vidéos) puis de type synchronisé (22% soit 51 vidéos) et enfin les représentations décalées de type II (8 % soit 19 vidéos). Il est à noter cependant que la répartition par niveaux d'étude présente de grandes variabilités : le choix du type de collision diffère selon les groupes et selon les vidéos d'un même groupe.

¹³ Cela signifie que, nous avons comptabilisé 107 vidéos comprenant une représentation d'une collision de type I sur les 233 vidéos recueillies, ce qui donne une fréquence relative de 46 %.

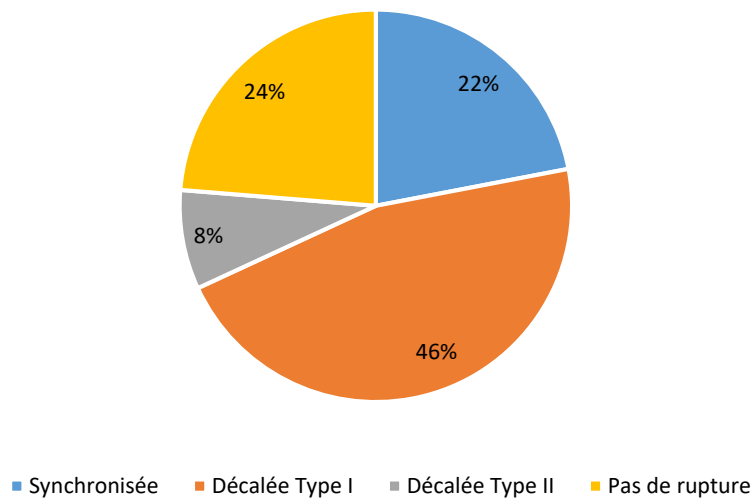


Figure 29 : Schéma en secteurs de la fréquence relative du type de représentation de la collision, produites dans les vidéos réalisées par les élèves de l'enseignement secondaire, en considérant l'ensemble des vidéos.

Les schémas ci-dessous (figure 30) présentent la fréquence relative de représentation du type de collision en fonction des niveaux d'étude des élèves.

La fréquence relative de représentation de la collision décalée de type II est peu élevée dans tous les groupes. Il est de maximum 11 % (en sixième année). La représentation majoritaire est la collision décalée de type I, sauf pour les élèves de cinquième année, qui utilisent majoritairement la collision synchronisée.

La collision synchronisée est très peu utilisée chez les élèves de sixième année (10 % soit 8 vidéos sur 79). La fréquence relative associée à ce type de collisions est de 23 % (soit 24 vidéos sur 105) chez les élèves de troisième année et de 39 % (soit 19 vidéos sur 49) chez les élèves de cinquième année. Cette représentation de la collision est pourtant celle qui semblait la plus appropriée dans le cas de cette application.

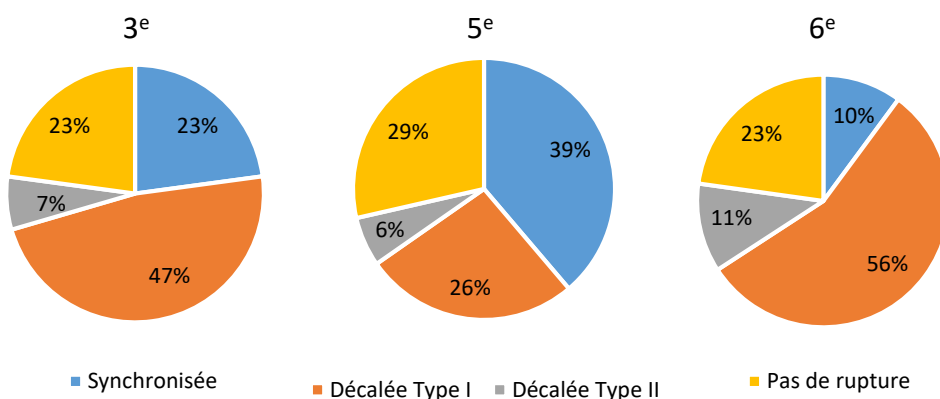


Figure 30 : Schéma en secteurs de la fréquence relative du type de représentations de la collision, produites dans les vidéos réalisées par les élèves de 3^{ème}, 5^{ème}, et 6^{ème} secondaire.

Discussion

La représentation de la collision la plus utilisée est donc la collision décalée de type I, c'est-à-dire une rupture spontanée des liaisons avant la collision et la formation de nouvelles liaisons. Dans ce cas, les élèves visualisent la réaction en différentes étapes : la première étant la rupture des liaisons (la séparation des réactifs) et la deuxième étant la collision permettant la formation des produits. Les élèves de sixième année ont le taux de représentation de la collision décalée de type I le plus grand. Cela est probablement dû à l'UAA 6 (en sciences générales) comprenant les premiers concepts de la thermochimie avec les notions d'énergie d'activation. En effet, il est nécessaire d'avoir une certaine énergie pour casser la liaison afin d'accéder à la formation des produits. Cela peut induire la représentation de la rupture de liaisons avant d'entrer en collision et former les produits. Une autre visualisation qui pourrait favoriser cette interprétation est la notion de dissolution (UAA 2 en sciences générales) avec la formation d'ions dans l'eau. Dans ce cas, la représentation d'ions dissociés dans l'eau pourrait être assimilée à la représentation de la collision décalée de type I.

L'autre représentation très présente chez les élèves de notre échantillon est la collision sans rupture de liaison. On peut voir deux raisons distinctes de ce choix de représentation de la collision. Tout d'abord, cela peut être dû à une vision additive de la réaction chimique. Les élèves juxtaposent les réactifs pour former les produits. Ensuite, cela peut aussi venir de l'absence de représentation des liaisons. En effet, dans certaines vidéos, aucune liaison n'est représentée dans les réactifs : ils sont sous forme d'atomes dissociés. Il n'y a donc pas de rupture de liaisons possible. Ces élèves confondent donc probablement les notions de molécule et d'atome ou encore d'indice et de coefficient stœchiométrique.

La représentation de la collision qui aurait le mieux convenu pour cette activité aurait été la collision synchronisée. Seuls les élèves de cinquième année présentent une grande fréquence relative de représentation de ce type de collision (environ 40 %). Pendant la réalisation du test avec ces groupes, nous avons entendu plusieurs élèves parler de la théorie des collisions. Pourtant, cette notion n'est plus au programme de l'enseignement secondaire en Fédération Wallonie-Bruxelles : nous posons l'hypothèse qu'un professeur a dû en discuter avec ces élèves lors d'une activité complémentaire. Nous supposons donc que ce concept permet d'avoir une meilleure visualisation du mécanisme de la réaction chimique au niveau microscopique.

9.2. Interprétation additive

Comme prévu dans la littérature, deux types distincts de représentation additive ont été utilisés par les élèves de l'enseignement secondaire :

- Catégorie I : les réactifs sont juxtaposés pour donner le produit, sans rupture de liaisons (figure 31). Cette visualisation peut entraîner la création de produits incorrects.



Figure 31 : Exemple de représentation additive de catégorie I (3.G15.E2). Une molécule de dihydrogène (aimants bleu) et une molécule de diiode (aimants orange) se juxtaposent pour former une molécule hypothétique de H_2I_2 .

- Catégorie II : formation d'intermédiaires hypothétiques composés d'un même type d'atomes (exemple : « Fe_2 » et/ou « O_3 » pour former le « Fe_2O_3 »). Ces molécules hypothétiques sont une décomposition en corps purs simples de la formule brute du produit. (Figure 32)

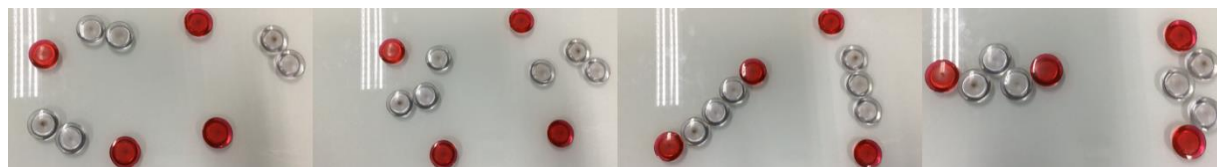


Figure 32 : Exemple de représentation additive de catégorie II (6.G7.E3). Les couples d'aimants blancs représentent les molécules de « O_2 ». Un de ces couples se séparent pour former un groupe de « O_3 » avant que les aimants rouges ne se juxtaposent pour former deux assemblages « Al_2O_3 ».

On peut observer les deux types d'interprétation additive séparément mais également dans une même vidéo. En effet, les intermédiaires hypothétiques formés peuvent ensuite être collés pour former les produits (figure 33).

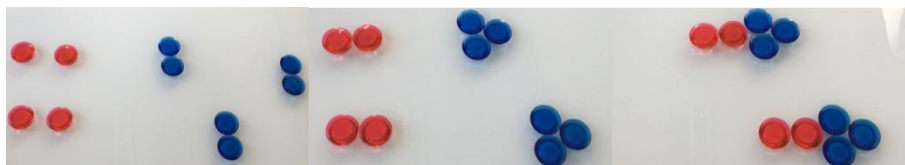


Figure 33 : Exemple de représentation additive de catégorie I et II (3.G15.E3). Les aimants se rassemblent en deux groupes par couleur avant de se juxtaposer deux à deux pour former deux molécules de Al_2O_3 .

La figure 34 présente les fréquences relatives de représentation de type additive des différents groupes d'élèves, par niveaux d'étude. On peut voir que la fréquence relative de représentation additive est assez importante chez les élèves de troisième année, puis qu'elle diminue pour les élèves de cinquième et sixième années.

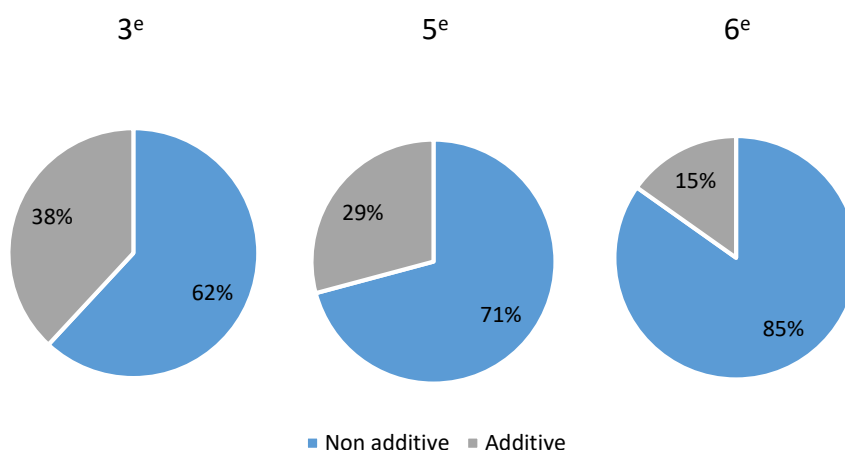


Figure 34 : Graphique en secteurs de la fréquence relative de représentation additive des élèves de 3^{ème}, 5^{ème} et 6^{ème} année de l'enseignement secondaire.

La figure 35 est un histogramme reprenant toutes les vidéos réalisées par les élèves testés, ventilées par équations chimiques. L'apparition de la représentation additive de catégorie II, présente dans 17 % du total des vidéos, survient à partir de l'équation 3. Il est en effet difficile de réaliser cette interprétation avec les deux premières réactions¹⁴. On peut observer également

¹⁴ Il est difficile de faire la différence, dans le cas des deux premières équations, entre une représentation de la collision décalée et la représentation additive avec formation d'un intermédiaire. Par exemple, pour l'équation 1, la collision décalée implique la dissociation de la molécule de dioxygène en deux atomes d'oxygène et la représentation additive de type II implique la création d'intermédiaires hypothétiques qui sont des atomes d'oxygène dissociés.

une plus grande proportion de représentation additive de catégorie II par rapport à la représentation de catégorie I dans le cas de l'équation 4.

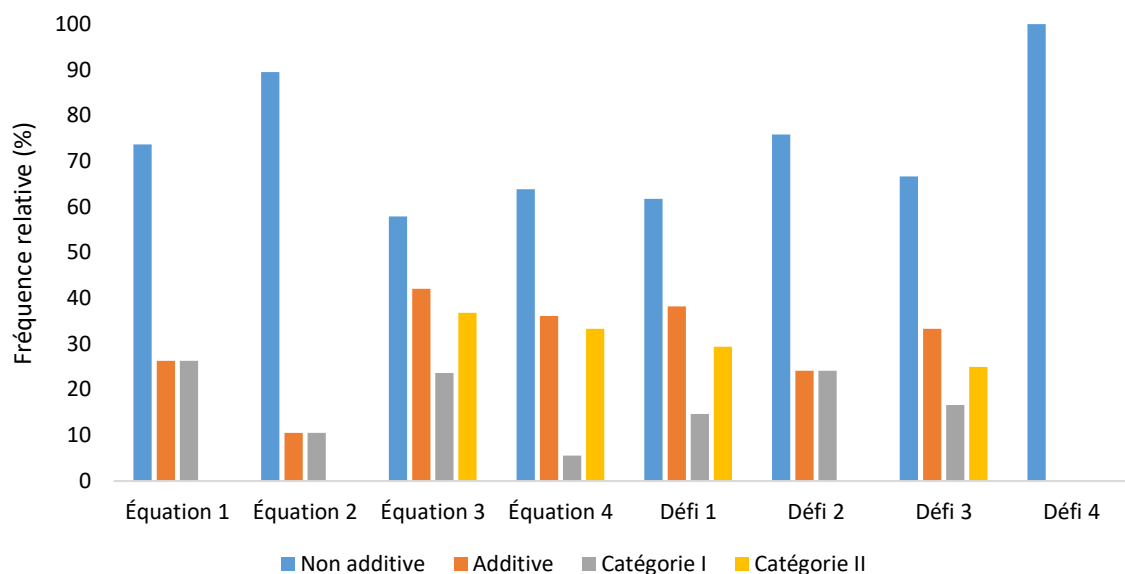


Figure 35 : Histogramme de la fréquence relative de vidéos ne contenant pas de représentation additive, contenant une représentation additive, contenant une représentation additive de catégorie I et contenant une représentation additive de catégorie II.

Avec la figure 36, nous pouvons voir que la diminution du nombre de représentations additives de catégorie I semble corrélée avec l'avancement des élèves dans le cursus de chimie. Il y a en effet une forte diminution de la fréquence relative des représentations additives de catégorie I et de catégorie II, dès la cinquième année.

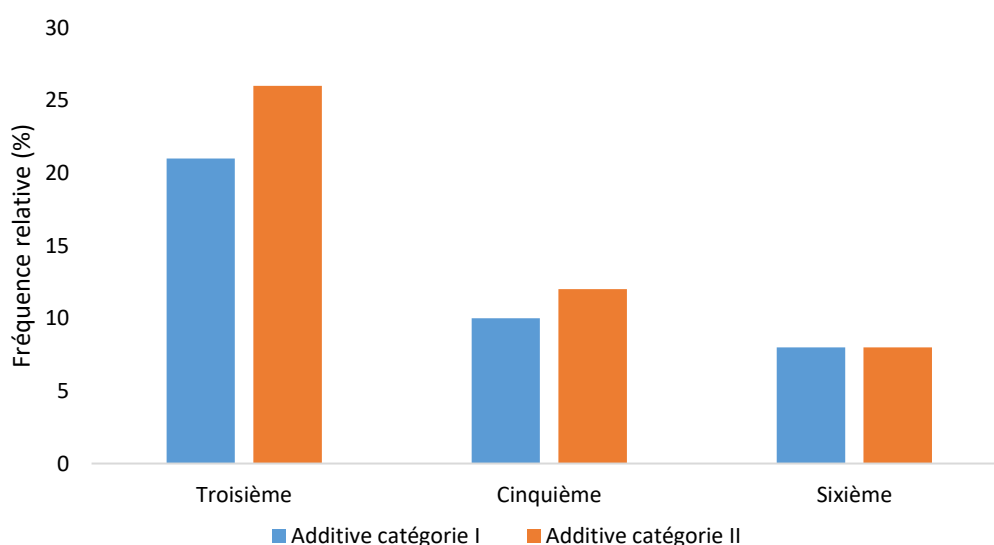


Figure 36 : Histogramme de la fréquence relative de vidéos contenant une interprétation additive de catégorie I et de catégorie II par niveaux d'étude.

Discussion

L'interprétation additive est une représentation classique de la réaction chimique chez les élèves au début de leur apprentissage (Mzoughi-Khadhraoui & Dumon, 2012). On peut voir que l'avancée dans le cursus de chimie favorise l'élimination de cette conception erronée de la réaction chimique. Elle a d'ailleurs complètement disparu chez les enseignants en formation d'AESS chimie.

Cette interprétation disparaît car, probablement, au fur et à mesure des années, il est demandé aux élèves de dessiner fréquemment des structures de molécules. Ils voient donc qu'il y a un arrangement particulier des atomes dans une molécule mais, surtout (par extension), qu'il y a un réarrangement des atomes pendant une réaction chimique. De plus, c'est lors de la cinquième année de l'enseignement secondaire que les liaisons chimiques sont introduites dans l'UAA 5, en sciences générales.

La représentation additive de catégorie II, qui consiste à créer un intermédiaire hypothétique, est beaucoup utilisée par les élèves lorsque cela a un sens. Cette interprétation induit, de nouveau, une notion d'étape de réaction. Cela montre la façon de penser de certains élèves lorsqu'ils voient la formule d'une molécule : ils la décomposent mentalement en types d'atomes (ou de molécules plus petites) puis reconstruisent ensuite la molécule. Cette représentation se base sur une interprétation d'abord mathématique de l'équation chimique avant de reconstruire à partir de cette vision le point de vue chimique.

9.3. Mouvement des particules

Dans les vidéos produites par les élèves de l'enseignement secondaire, la presque totalité des molécules sont en mouvement. Il n'y a que dans certains cas particuliers, que nous allons décrire, que des molécules ou atomes ne sont pas en mouvement.

9.3.1. Interprétation de type agent/action/patient

Prenons le cas des représentations de type agent/action/patient (A/A/P) où le réactif agent attaque le réactif patient, qui ne bouge pas. On peut voir avec les graphiques de la figure 37 que peu d'élèves réalisent ce type de représentation. En effet, moins de 20 % des vidéos représentent une interprétation de type A/A/P.

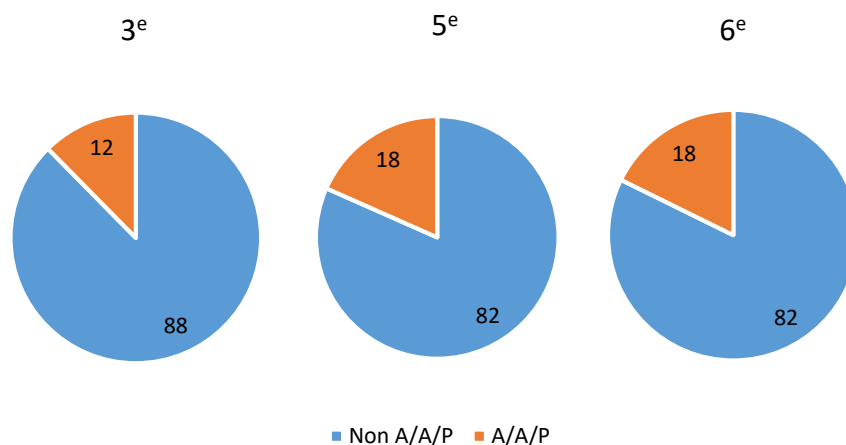


Figure 37 : Graphique en secteurs de la fréquence relative de vidéos contenant une interprétation de type agent/action/patient, par niveaux d'étude.

Le graphique suivant (figure 38), permet de voir la fréquence d'utilisation de l'interprétation de type A/A/P en fonction des équations. Au premier regard, on pourrait dire que la représentation de type A/A/P est aléatoire. Cependant, on peut regrouper certaines équations en fonction de la fréquence de cette représentation. L'équation avec la plus haute fréquence relative (26 %) est l'équation 1. Les deux suivantes (20 %), sont l'équation 3 et le défi 1. Ce sont les seules équations dans lesquelles l'état solide, qui pourrait induire l'interprétation de type agent/action/patient, est indiqué pour les réactifs. Ensuite viennent l'équation 2 (11 %) et le défi 4 (13 %) qui n'indiquent pas d'état précis de la matière. Les équations ayant la plus faible fréquence relative d'A/A/P sont l'équation 4 (14 %) et les défis 2 (7%) et 3 (8%). Ce sont les équations qui proposent des réactifs à l'état gazeux ou qui n'indiquent pas de réactifs.

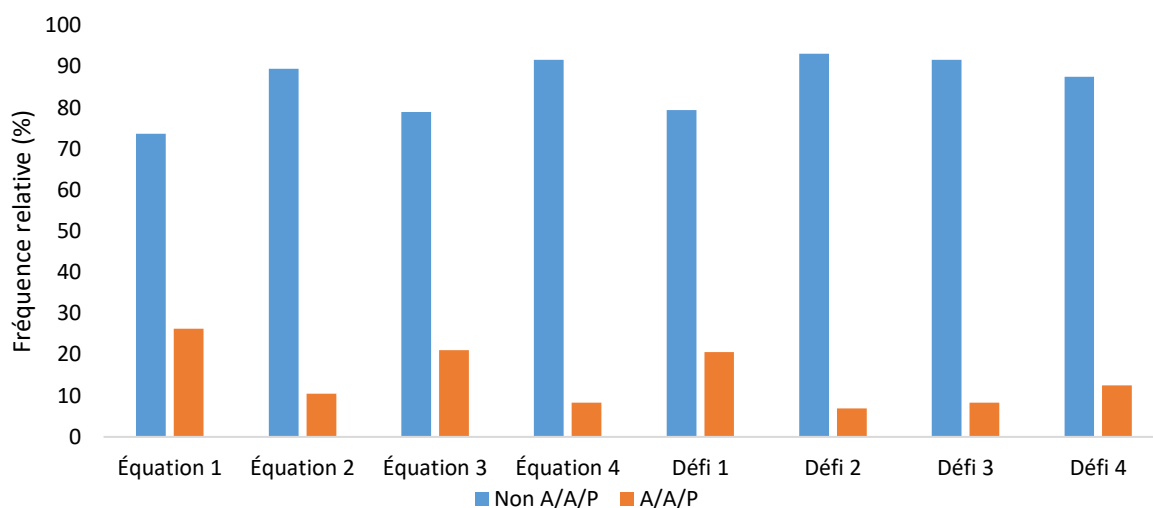


Figure 38 : Histogramme de la fréquence relative des vidéos réalisées par les élèves de l'enseignement secondaire présentant une interprétation de type agent/action/patient, en fonction des équations.

La fréquence relative de l'interprétation de type agent/action/patient devrait être a priori corrélée avec la fréquence relative des vidéos rendant compte de l'état solide. En effet, nous nous attendons à ce que les particules représentées à l'état solide soient statiques. Les particules liées à l'état solide devraient donc être les patients (statique) et les autres particules (à l'état gazeux ou liquide) devraient être les agents (en mouvement). Mais, comme on peut le voir à la figure 39, ce n'est pas le cas.

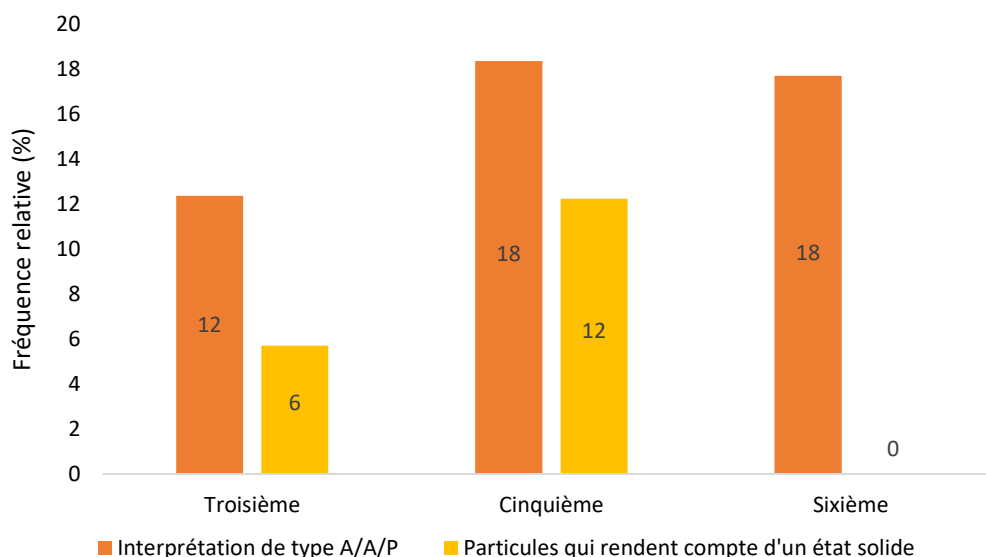


Figure 39 : Histogramme de la fréquence relative de vidéos contenant une interprétation de type agent/action/patient et des vidéos rendant compte de l'état solide

Prenons l'exemple des élèves de troisième année. Dans ce cas, seuls 12 % de leurs vidéos représentent une interprétation de type A/A/P. On peut voir que seul 6 % des vidéos concernent un état solide. Si 6 % (6 vidéos sur les 105 recueillies) des vidéos des élèves de troisième année rendent compte de l'état solide en utilisant l'interprétation de type A/A/P, cela signifie que les autres 6 % réalisent cette interprétation sans rendre compte d'un état solide (figure 40).



Figure 40 : Exemple de représentation d'une interprétation de type agent/action/patient ne rendant pas compte de l'état solide (3.G15.E1). La molécule de dioxygène (aimants bleu) est « le patient » et est statique. L'atome de carbone (aimant rouge) est « l'agent » et attaque la molécule de dioxygène.

Cette fréquence relative (ainsi que la fréquence relative concernant l'interprétation de type A/A/P) augmente pour les élèves de cinquième année. Dans le cas des élèves de sixième année, aucun groupe n'utilise l'interprétation de type A/A/P dans le cas d'un réactif représenté à l'état solide. Cela signifie que toutes les vidéos avec ce type d'interprétation (14 vidéos sur les 79 recueillies pour les élèves de sixième année) présentent des particules statiques, sans représentation de l'état de la matière.

Regardons uniquement les résultats concernant les équations où l'état solide est indiqué (c'est-à-dire l'équation 3 et le défi 1). Sur les 25 vidéos recueillies représentant ces réactions, 15 contiennent une représentation de type agent/action/patient et, parmi ces vidéos, seul 10 rendent compte d'un état solide.

9.3.2. Etats de la matière

Peu de groupes prennent en compte de manière adéquate les états de la matière et aucun groupe n'en parle dans la feuille de description. Dans la majorité des cas (80 % de toutes les vidéos), les particules sont représentées en mouvement pour entrer en contact, quel que soit l'état indiqué (ou non) dans l'équation chimique. Cependant, quelques constats peuvent être établis pour l'état solide et l'état gazeux.

Dans le cas de l'état solide, nous avons vu au point précédent que peu d'élèves considéraient les particules comme étant statiques. Quelques groupes ont cependant représenté ces particules sous forme de bloc compact en mouvement. Sur les 84 vidéos recueillies indiquant un état solide dans l'équation, 35 vidéos comprennent un bloc compact en mouvement, soit 42 % de l'ensemble.

Dans le cas de l'état gazeux, nous avons pu observer que, dans certains cas, les élèves considéraient des particules à l'état gazeux comme dissociées, n'ayant pas de liaisons intramoléculaires. 32 vidéos recueillies sur les 64 associées à une équation chimique indiquant l'état gazeux d'un composé sur l'équation, comprennent une telle représentation, soit la moitié de l'échantillon.

Discussion

On peut dire que les états de la matière indiqués dans les équations sont peu pris en compte de manière adéquate par les élèves. Seul les élèves de troisième et de cinquième année donnent l'impression d'avoir pris en compte l'état solide des particules en les laissant statiques et en les représentant de manière compactes, ordonnées. Il était prévu que les élèves de troisième année prennent plus en compte les états de la matière que les élèves plus âgés car ils ont eu plusieurs rappels durant l'année sur cette notion. Dans le cas des élèves de cinquième année, le professeur de sciences a témoigné qu'il insistait également beaucoup sur les états de la matière.

Dans le cas des élèves de sixième année, le programme insiste beaucoup sur le côté quantitatif de la réaction chimique. Les états de la matière sont donc soit très peu utilisés, soit utilisés de façon abstraite dans les cours de chimie car ils sont considérés comme étant des prérequis.

Cependant, presque la moitié des élèves ont tout de même représenté l'état solide sous forme de bloc compact. Il est cependant difficile d'affirmer qu'ils voulaient représenter l'état solide. En effet, peu ont parlé des états de la matière sur leur feuille de description. De plus, plusieurs groupes ont également représenté des particules à l'état gazeux sous forme de bloc compact.

Dans 32 vidéos, les groupes représentaient l'état gazeux sous forme dissociée, sans liaison entre les atomes. Cette vue tronquée est probablement due à la première notation (vue au premier degré) des états de la matière où 1 molécule est représentée par 1 cercle. Il y a ici une persistance probable de la confusion entre atome et molécule, représentés tous deux par un même symbole (une sphère).

Une représentation dissociée des molécules peut également être due à la notion de liaison ionique (vue dans l'UAA 5). Certains élèves de sixième année écrivent dans leur feuille de description que, lorsque la liaison est ionique, il n'y a pas de réelle liaison entre les atomes ou groupes d'atomes et donc qu'ils ne sont pas « attachés ».

Dans le cas de l'état liquide (défi 1 : $SO_{3(l)}$), très peu d'élèves l'ont pris en compte. Tout d'abord, « SO_3 » étant le produit de la réaction, la plupart des vidéos s'arrêtent juste après sa formation. Il est donc difficile d'observer le mouvement de ces particules. Cependant, quelques groupes ont aggloméré les particules après leur formation, uniquement pour cette réaction et le défi 2 (formation de l'eau). Un groupe d'élèves de troisième année (3.G5.D1) a créé un récipient fait d'aimants pour bien indiquer que ces particules étaient à l'état liquide.

Tout ceci montre bien la difficulté des élèves à comprendre et à représenter les états de la matière au niveau microscopique. Mais il est en effet délicat d'affirmer que seulement deux particules représentent l'état solide, liquide ou gazeux en représentation microscopique. Cela est sans doute une des limites de la technique du slowmation.

9.4. Formule brute et structure des produits

9.4.1. La pondération

Nous allons tout d'abord nous intéresser à la pondération de certaines réactions (tableau 6).

Équation 4	$N_{2(g)} + 3 H_{2(g)} \rightarrow$
Défi 1	$S_{(s)} + O_{2(g)} \rightarrow SO_{3(l)}$
Défi 2	$H_{2(g)} + O_{2(g)} \rightarrow \dots$
	Représenter à l'état initial 4 molécules de dihydrogène et 4 molécules de dioxygène
Défi 3	$\dots + \dots \rightarrow Fe_2O_{3(s)}$

Tableau 6 : Équations nécessitant une pondération (ajout de coefficients stœchiométriques)

On peut voir grâce à la figure 41 que la fréquence relative des groupes ayant pondéré de manière adéquate dépend de l'équation chimique.

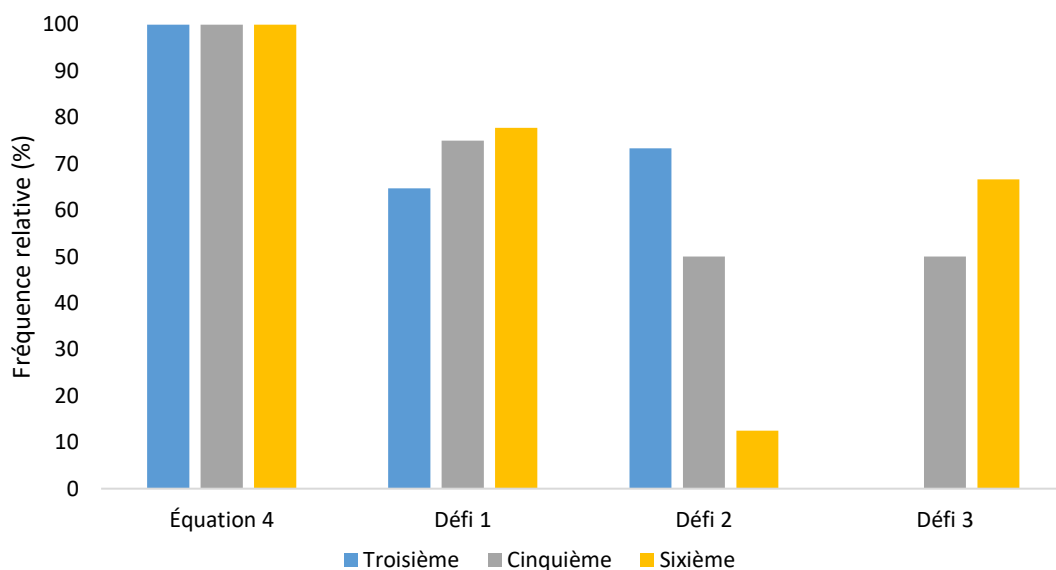


Figure 41 : Histogramme de la fréquence relative des groupes représentant la pondération attendue pour l'équation 4 et les défis de 1 à 3.

La pondération de l'équation 4 est réussie pour tous les groupes quelle que soit l'année d'étude. Ensuite, on peut voir une chute de la fréquence relative de pondération correcte pour le défi 1 ainsi que pour le défi 2. On peut observer que ce défi 2 est mieux réussi par les élèves de troisième année que par les élèves de cinquième ou sixième année. Pour le défi 3, la pondération de cette équation n'est réussie par aucun groupe de troisième mais il y a une augmentation dans le cas des élèves de cinquième et sixième année. Dans ce cas, les réactifs étaient à prédire et c'est une mauvaise prédiction des réactifs qui engendrent une mauvaise pondération.

Discussion

On peut voir que l'équation 4 a correctement été pondérée chez tous les groupes. Les coefficients des réactifs étant déjà notés, cela a dû leur rappeler de pondérer l'équation. De plus, des pointillés étaient indiqués à la place du produit, leur indiquant qu'ils devaient compléter l'équation.

Par contre, dans le cas du défi 1, l'équation était donnée (réactifs et produits) sans aucun coefficient stœchiométrique et aucune indication n'était présente pour leur signifier qu'ils devaient réaliser la démarche de pondération. Certains groupes n'ayant pas pondéré l'équation ont choisi de faire apparaître un atome d'oxygène : soit seul dans les réactifs ou soit lié à la

molécule au moment de la collision des réactifs. D'autres élèves ont demandé s'ils avaient le droit de pondérer l'équation.

Dans le cas du défi 2, ni la pondération ni la formule brute du produit était indiquée. De plus, l'indication supplémentaire sous l'équation a pu les déstabiliser. La pondération dans ce cas n'est pas adéquate car les élèves n'ont, dans la majorité des cas (surtout chez les élèves de sixième année), pas obtenu le bon produit.

Le cas du défi 3 est très similaire au défi 2, les réactifs utilisés ne correspondaient pas à ce qui était attendu. Le manque de coefficients dans l'équation induit donc la création de produits ou réactifs incorrects, ce qui a déjà été indiqué par Ben-Zvi, Eyal et Silberstein (1987).

On peut donc conclure que la pondération n'est pas instinctive chez tous les élèves. Une équation non pondérée, et sans indication qu'elle doit l'être, pose problème à environ 20 à 35 % des élèves testés. Ces résultats se retrouvent dans d'autres études. Dans l'étude de Abraham, Grzybowski, Renner et Marek (1992), les élèves sont confrontés à une équation non pondérée ($Fe + O_2 \rightarrow Fe_2O_3$) et à une question (« *Suppose four billion iron atoms rusted. How many particles of oxygen would be needed for this reaction? Explain how you reached your answer* »). Plus de 20 % des élèves ne pondèrent pas l'équation pour répondre à la question et utilisent un ratio 1:1. Une autre étude, réalisée par Ben-Zvi *et al.* (1987), a obtenu les mêmes résultats. Dans ce cas, les auteurs demandaient aux élèves de prédire le produit de réaction à partir de deux réactifs. Certains produits étaient écartés par les élèves car ils n'envisageaient pas la pondération.

Les professeurs doivent donc être clairs sur les attentes et les objectifs d'un exercice donné aux élèves et adapter en conséquence la présence (ou non) des coefficients stœchiométriques.

9.4.2. Les formules brutes

Intéressons-nous maintenant aux formules brutes des produits de réactions représentés dans les vidéos des élèves.

On peut voir (figure 42) que la grande majorité des élèves, plus de 75 %, arrivent correctement à passer de la représentation symbolique d'une molécule à une représentation microscopique. Cette capacité grandit avec l'avancement des élèves dans le cursus (même si elle est déjà importante en troisième année), elle passe de 75 % à 87 % de réussite.

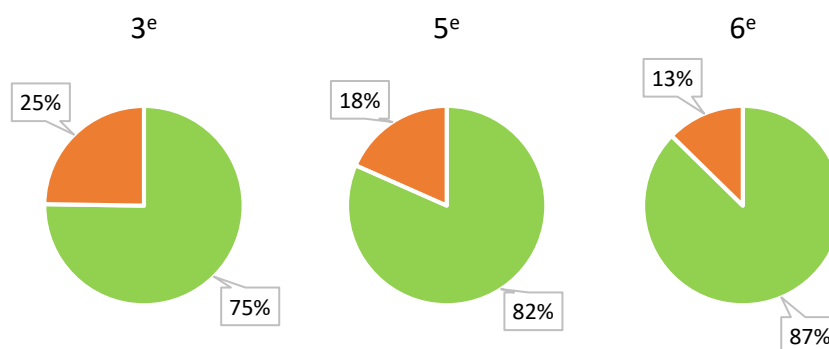


Figure 42 : Graphique en secteurs de la fréquence relative de formule brute¹⁵ correcte (vert) et incorrecte (orange) des produits des réactions représentés dans les vidéos des élèves de l'enseignement secondaire.

Les élèves de sixième année présentent une plus grande fréquence relative de formule brute correcte et les élèves de troisième année présentent les taux les plus bas (figure 42). Les graphiques A et B de la figure 43 présentent la fréquence relative de formule brute correcte en fonction du niveau d'étude et de l'équation considérée. On y repère une exception importante : le défi 2 engendre une tendance inverse à la tendance générale. En effet, la fréquence relative de réponses correctes est plus grande chez les élèves plus jeunes que chez les élèves plus âgés.

Les graphiques de la figure 43 montrent également que les plus faibles fréquences relatives de formule brute correcte surviennent dans le cas particulier du défi 2.

¹⁵ Les formules brutes ont été obtenues en retranscrivant la représentation microscopique en notation symbolique.

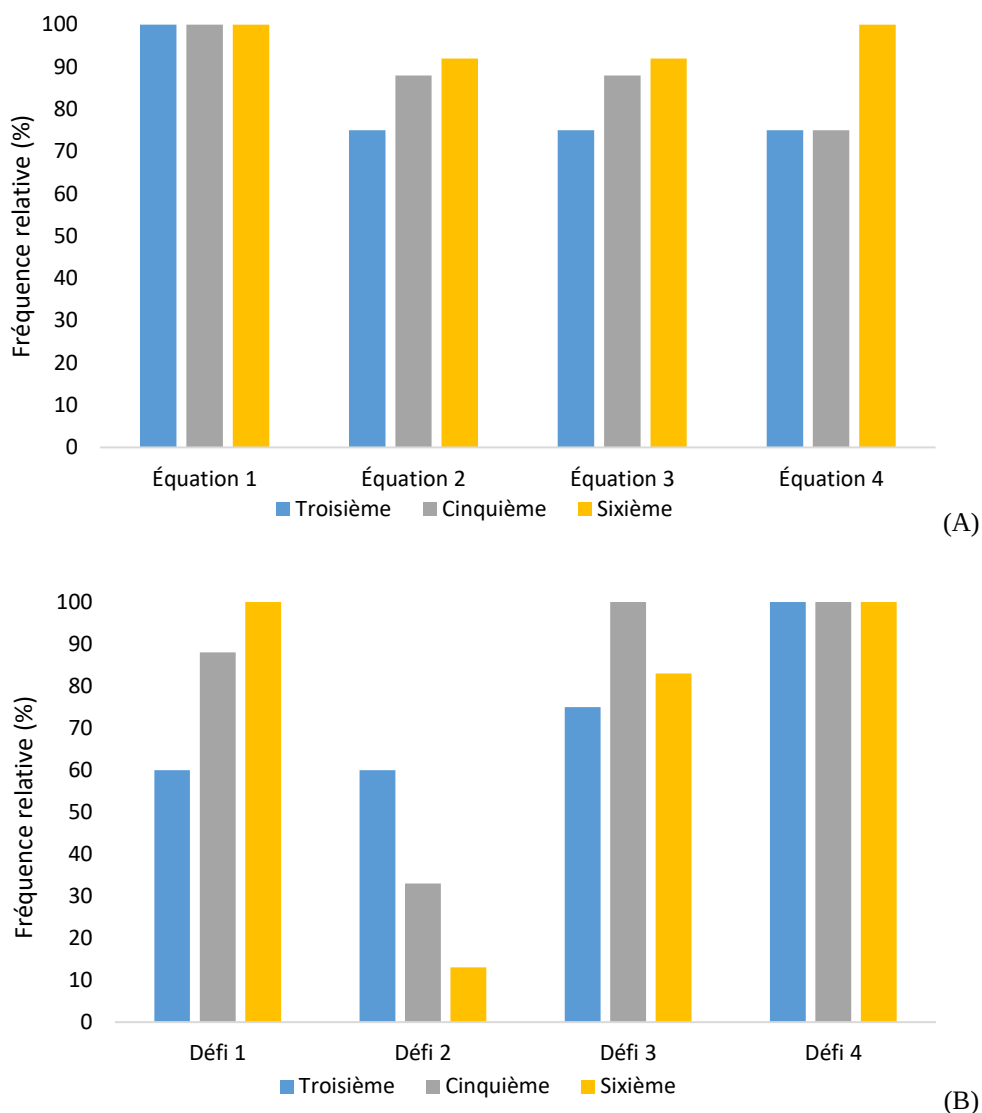


Figure 43 : Histogramme de la fréquence relative de formule brute correcte retranscrite à partir des vidéos des élèves de l'enseignement secondaire dans le cas des produits des équations (A) et des défis (B)

Le tableau 7 reprend toutes les retranscriptions des formules brutes incorrectes correspondant aux représentations microscopiques des produits observés dans les vidéos des élèves. Certaines de ces formules brutes sont dues à des confusions entre indice et coefficient. Par exemple, dans le cas de l'équation 4, des élèves ont représentés une molécule hypothétique de N_2H_6 (tableau 7). Ils ont donc attribué au coefficient la même définition qu'à l'indice. Peu de vidéos laissent cependant apparaître ce type de confusion :

- 14 vidéos sur 105 (13 %) pour les élèves de troisième année
- 6 sur 49 (12 %) pour les élèves de cinquième année
- 5 sur 78 (6 %) pour les élèves de sixième année

Dans ces fréquences relatives sont incluses les additions du coefficient et de l'indice. Par exemple, dans le cas de l'équation 3, des élèves ont représenté une molécule hypothétique de Al_4O_3 (tableau 7). Ils ont donc additionné le coefficient stœchiométrique et les indices. Cette erreur constitue une très faible partie de la confusion entre indice et coefficient. Elle survient uniquement chez les élèves de troisième année, dans le cas de l'équation 3 (2 vidéos sur 105).

Équation 2	H_2I_2				
Équation 3	Al_4O_5	$2 Al_2 + 2 O_3$	Al_4O_3	$2 (2 Al + 3 O)$	Al_4O_6
Équation 4	$6 H + 2 N$	$2 N + 2 H_3$	N_2H_6	$2 (N + 3 H)$	
Défi 1	S_2O_6	$2 (S + 3 H)$	SO_2	$SO + 2 O$	H_4O_4
Défi 2	H_2O_2	H_8O_4	OH	$O + 2 H$	
Défi 3	$2 FeO + O$	$2 Fe + 3 O$			

Tableau 7 : Retranscription des formules brutes incorrectes à partir des représentations microscopiques des produits de réactions, proposés par les élèves.

Discussion

Le lien entre le niveau symbolique et le niveau microscopique semble assez clair pour les élèves de l'enseignement secondaire. Il se raffermirait encore lorsqu'ils avancent dans le cursus en chimie. Mais certaines erreurs sont pourtant présentes.

Tout d'abord, les notions d'indice et de coefficient stœchiométrique ne sont pas toujours claires dans l'esprit des élèves de troisième année. Cela rejoint les recherches de plusieurs auteurs (Nakhleh, 1992 ; Mzoughi-Khadhraoui & Dumon, 2012). Cette confusion diminue avec les années, ce qui est probablement dû à l'utilisation de ces notions dans un plus grand nombre d'exercices différents. Dans le cas des élèves de cinquième année, la fréquence relative de présence de cette confusion est due à 1 groupe (sur 8) qui a réalisé la presque totalité de ses vidéos en agglomérant les molécules pour donner le produit. Dans certains cas, elle peut être la conséquence de la représentation des états de la matière.

Une autre erreur est l'addition du coefficient stœchiométrique avec l'indice. Cette erreur survient en combinaison avec la confusion entre indice et coefficient.

La vue dissociative des molécules, dont nous avons parlé plus tôt, est également une source d'erreurs de la formule brute. Cette vue peut être la conséquence de la représentation de l'état gazeux ou de la confusion classique entre atome et molécule.

Certains groupes de troisième année s'arrêtent à la formation d'intermédiaires hypothétiques de la représentation additive de catégorie II. Cette erreur montre une compréhension incorrecte de la notion de molécule. Cette erreur est cependant rare.

La dernière source d'erreur de la formule brute est simplement le fait de ne pas avoir trouvé le bon produit (équation 4, défi 2 et défi 4). C'est en effet la cause de la faible fréquence relative de réponses correctes du défi 2 pour les élèves de cinquième et de sixième année.

9.4.3. Représentation géométrique des produits

Le visionnage des vidéos a fait émerger différents types de structure typique des molécules représentées. Nous avons séparé les représentations des molécules avec une formule brute incorrecte et les représentations avec une formule brute correcte, par rapport à l'équation de départ.

Nous avons trouvé et nommé 4 types de catégories pour les molécules avec la formule brute demandée. Nous empruntons les noms à la typologie proposée par Dehon (2018) :

- Linéaire : les molécules sont composées de 2 blocs liés par une liaison. C'est une retranscription de la formule brute (figure 44).



Figure 44 : Représentation linéaire d'une molécule de SO_3 (3.G5.D1). On voit un atome de soufre (vert) et trois atomes d'oxygène (blanc) juxtaposés de manière linéaire.

- À plusieurs accroches : les molécules sont composées de 2 blocs liés par au moins 2 liaisons (figure 45).



Figure 45 : Représentation à plusieurs accroches d'une molécule de Al_2O_3 (3.G16.E3). Un bloc est composé de deux atomes d'aluminium (blanc) et l'autre bloc est composé de trois atomes d'oxygène (rouge). Les deux blocs sont juxtaposés.

- Décalée : les molécules sont composées d'un bloc avec des atomes liés dispersés autour. Cette géométrie n'est valable que lorsqu'il y a au moins 3 atomes dans la molécule. La représentation décalée ne rend pas compte d'angles optimisés (voir figure 46).



Figure 46 : Représentation décalée d'une molécule de NH_3 (6.G3.E4). L'atome d'azote (rouge) est le bloc central et les atomes d'hydrogène (blanc) sont dispersés autour mais sans espace optimisé.

- Alternée : dans ce cas, il n'y a plus de blocs, il y a une alternance des atomes pour former la molécule et/ou une volonté de représenter des angles optimisés (120° dans le cas de la figure 47).



Figure 47 : Représentation alternée d'une molécule de NH_3 (5.G1.E4) L'atome d'azote (vert) est le bloc central et les atomes d'hydrogène (bleu) sont dispersés autour, de manière à optimiser l'espace disponible.

Ensuite, nous avons séparé les molécules avec une formule brute incorrecte par rapport à l'équation de départ, en 5 catégories :

- Agrégat par blocs : les aimants forment un seul bloc composé de 2 sous-blocs (figure 48).

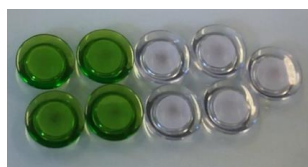


Figure 48 : Représentation en agrégat par blocs d'une molécule hypothétique de Al_4O_5 (3.G12.E3). Le premier bloc est composé de quatre atomes d'aluminium (vert) et le deuxième bloc est composé de cinq atomes d'oxygène (blanc).

- Agrégat dispersée : les aimants forment un seul bloc, sans regroupement par type, et sans regroupement en molécule identifiable (figure 49).



Figure 49 : Représentation en agrégat dispersée d'une molécule hypothétique de Al_4O_6 (5.G7.E3). Le bloc central est composé de quatre atomes d'aluminium (rouge) et les six atomes d'oxygène (blanc) sont dispersés autour du bloc central.

- Agrégat moléculaire : les aimants forment un seul bloc mais on peut le décomposer en sous-groupes représentant une molécule correspondant à la formule brute demandée (figure 50).



Figure 50 : Représentation en agrégat moléculaire d'une molécule hypothétique de H_2I_2 (3.G10.E2) dans laquelle on observe les deux molécules de HI, juxtaposées.

- Dissocié : les aimants ne se touchent pas. Il n'y a donc pas de représentations de molécules, seulement d'atomes (figure 51).



Figure 51 : Représentation dispersée de deux molécules de NH_3 (3.G12.E4). On observe la représentation de six atomes d'hydrogène (bleu) et de deux atomes d'azote (rouge), dispersés dans l'espace.

- Autres : les autres représentations qui n'appartiennent pas aux autres catégories et qui correspondent souvent à une confusion entre indice et coefficient (figure 52).

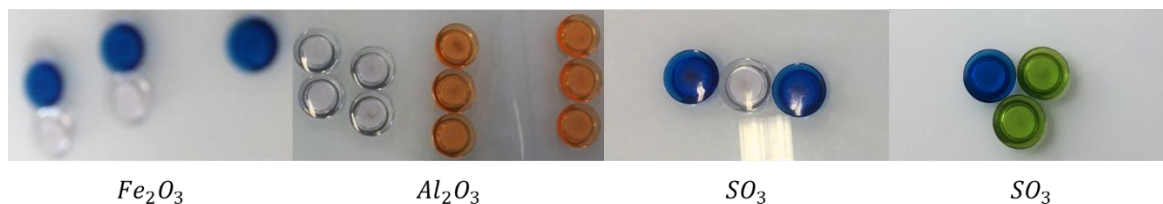


Figure 52 : Représentation d'autres structures trouvées dans les vidéos des élèves de l'enseignement secondaire, ainsi que la formule brute du produit demandé (3.G15.D3; 3.G14.E3; 3.G14.D1; 3.G1.D1).

Intéressons-nous tout d'abord aux structures des produits qui présentent la formule brute demandée.

On peut voir, grâce aux graphiques de la figure 53, que les quatre catégories de structure géométrique de formule brute correcte se retrouvent dans chaque niveau d'étude

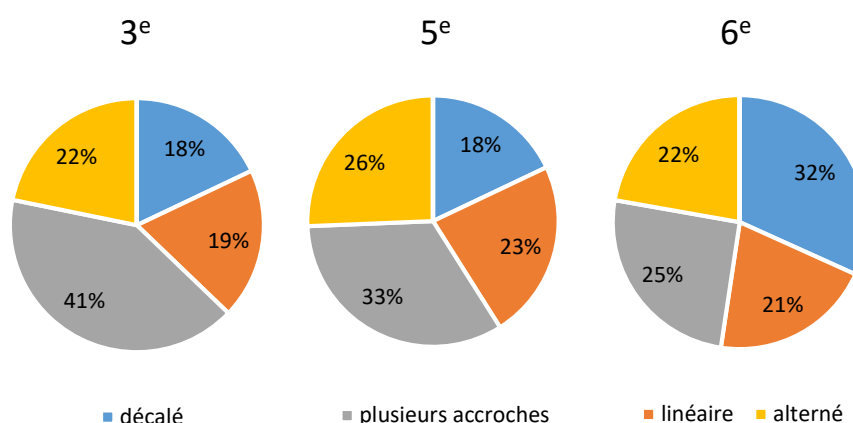


Figure 53 : Graphique en secteurs de la fréquence relative des différents types de représentations géométriques des produits avec la formule brute demandée dans l'équation chimique visée.

La fréquence d'utilisation d'une représentation à plusieurs accroches diminue légèrement de la troisième à la sixième année de l'enseignement secondaire (de 41 % à 25 %).

La représentation linéaire des molécules, présente dans environ 20 % des cas, est principalement utilisée dans le cas de l'équation 2 ($H_2 + I_2 \rightarrow 2 HI$). C'est en effet la seule représentation géométrique possible pour cette molécule afin d'obtenir la bonne formule brute.

Dans le cas de la représentation alternée des atomes dans la molécule, la fréquence relative reste, pour les trois années, très similaire. Elle se situe vers environ 24 % de fréquence d'utilisation.

Pour la dernière catégorie possible, la représentation décalée, on observe une fréquence relative de 18 % chez les élèves de troisième et de cinquième année, et la fréquence relative pour les élèves de sixième année est deux fois plus importante.

Les représentations présentant une formule brute incorrecte (figure 42) sont présentes en minorité dans les vidéos, moins de 25 % dans tous les niveaux d'étude.

Comme dit précédemment, 5 types de représentations incorrectes ont été catégorisées (figure 54). On peut observer dans chaque niveau d'étude les différentes catégories, sauf la catégorie « autre » qui est présente uniquement chez les élèves de troisième année, et la

catégorie « agrégat moléculaire » qui n'est pas utilisée chez les élèves de sixième année (le nombre de vidéos représentant une formule brute incorrecte étant moins élevé).

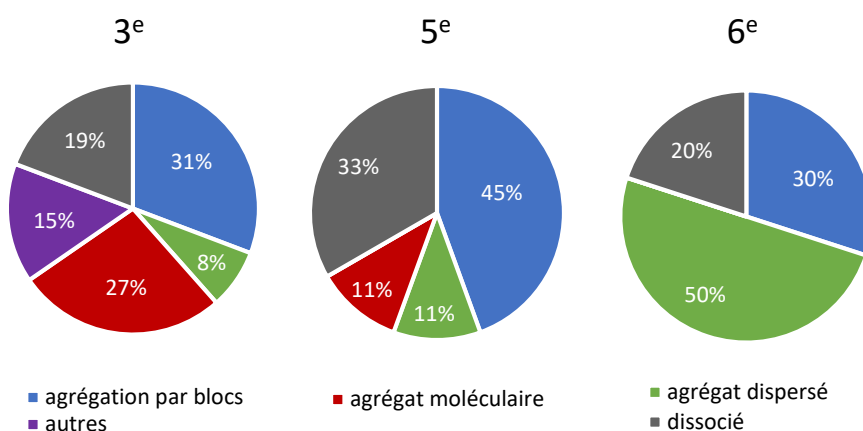


Figure 54 : Graphique en secteurs de la fréquence relative des différents types de représentations géométriques des produits qui n'ont pas les formules brutes indiquées ou prévues dans l'équation chimique.

La fréquence relative de représentation en agrégat par bloc augmente de la troisième à la cinquième année avant de diminuer pour les élèves de sixième année. Cette représentation est majoritaire chez les élèves de troisième et de cinquième année mais elle est en seconde place pour les élèves de sixième année.

La représentation des molécules via un agrégat dispersé est peu présente, de 8 à 14%, de la troisième à la cinquième année. Elle est cependant majoritaire, 50%, pour les élèves de sixième année, qui présentent cependant une fréquence relative de formule brute incorrecte (10 vidéos sur les 79 recueillies) inférieure aux autres groupes. Cette fréquence de 50 % est donc à relativiser au regard du nombre restreint de vidéos.

La fréquence relative des vidéos représentant un agrégat moléculaire est très inégale. Cette représentation est assez présente (27%) chez les élèves de troisième année, elle est peu présente (11%) pour les élèves de cinquième année et elle n'est pas du tout présente pour les élèves de sixième année.

Discussion

Les résultats obtenus pour les différentes catégories de représentation géométrique sont en accord avec la recherche de Dehon (2018), pour un public d'élèves en FWB.

La représentation géométrique la plus utilisée est la représentation à plusieurs accroches. Elle peut être due à plusieurs facteurs dont, premièrement, à l'interprétation additive où les élèves juxtaposent les atomes sans ruptures de liaison. Elle peut également être due à une mauvaise compréhension de la réorganisation des atomes pour arriver aux produits. Cette conception erronée semble diminuer avec un apprentissage plus poussé de la réaction chimique. Cependant, elle reste toujours présente dans certains groupes. Nous pensions que cette interprétation serait moins présente avec l'introduction de la notion de liaison mais ce n'est pas le cas.

La représentation alternée montre une bonne compréhension de la réorganisation des atomes pour former une molécule. Mais elle est utilisée principalement pour des molécules simples (les équations 1 et 4 et le défi 1).

Les élèves de sixième année utilisent surtout la représentation décalée. Ces élèves ont vu des notions de géométrie moléculaire avec les doublets agissant sur les angles de liaisons. Il est cependant étonnant que leur représentation majoritaire ne soit pas la représentation alternée qui présentent une meilleure optimisation des angles de liaisons.

Les représentations en agrégats sont dues à une confusion entre indice et coefficient stœchiométrique, et donc à une confusion entre molécule et atome mais également à une possible représentation des états de la matière.

La représentation en agrégat par blocs, très présente dans le cas des formules brutes incorrectes, est sans doute une confusion entre indice et coefficient stœchiométrique. En effet, les élèves séparent les différents types d'atomes comme s'ils lisaient l'équation comme une addition (figure 55). Elle peut être également liée à la méthode de pondération où on compte le nombre d'atomes par type.

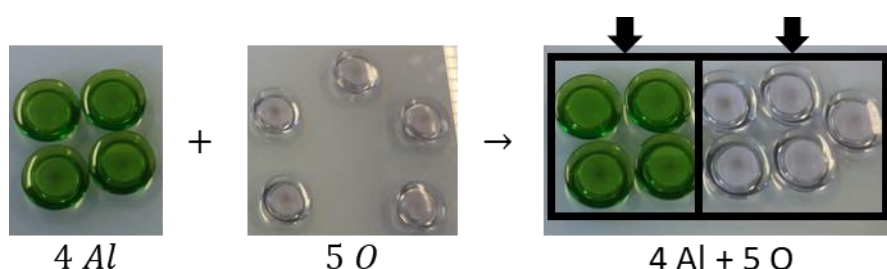


Figure 55 : Représentation en agrégat par blocs d'une molécule hypothétique de Al_4O_5 (3.G12.E3)

Dans le cas de la représentation en agrégat dispersé, il y a également une confusion entre indice et coefficient mais il y a une compréhension de la réorganisation des atomes dans une

réaction chimique. Cette représentation est surtout présente chez les élèves de sixième année dans le cas du défi 2 (représentation du peroxyde d'hydrogène).

La représentation en agrégat moléculaire est surtout présente chez les élèves de troisième année (mais pas du tout chez les élèves de sixième année). Cette représentation est principalement due à la représentation des états de la matière ou dans le cas de l'équation 2 (formation de la molécule hypothétique de H_2I_2).

9.5. Prédiction de produits et de réactifs

Les élèves devaient prévoir le produit de trois réactions (équation 4, défi 2 et défi 4) et les réactifs d'une autre (défi 3). Le tableau 8 reprend les équations de ces réactions.

Équation 4	$N_{2(g)} + 3 H_{2(g)} \rightarrow$
Défi 2	$H_{2(g)} + O_{2(g)} \rightarrow \dots$
Défi 3	$\dots + \dots \rightarrow Fe_2O_{3(s)}$
Défi 4	$CH_4 + 2 O_2 \rightarrow CO_2 + 2 \dots$

Tableau 8 : Équations dans lesquelles il est demandé aux élèves de prédire des réactifs ou un produit.

La figure 56 reprend les résultats des élèves de troisième secondaire, ventilés par équations. On peut voir que la proportion de formule brute attendue diminue avec la complexité¹⁶ de l'équation.

¹⁶ Etant entendu que nous posons une échelle de complexité croissante de l'équation 4 au défi 4.

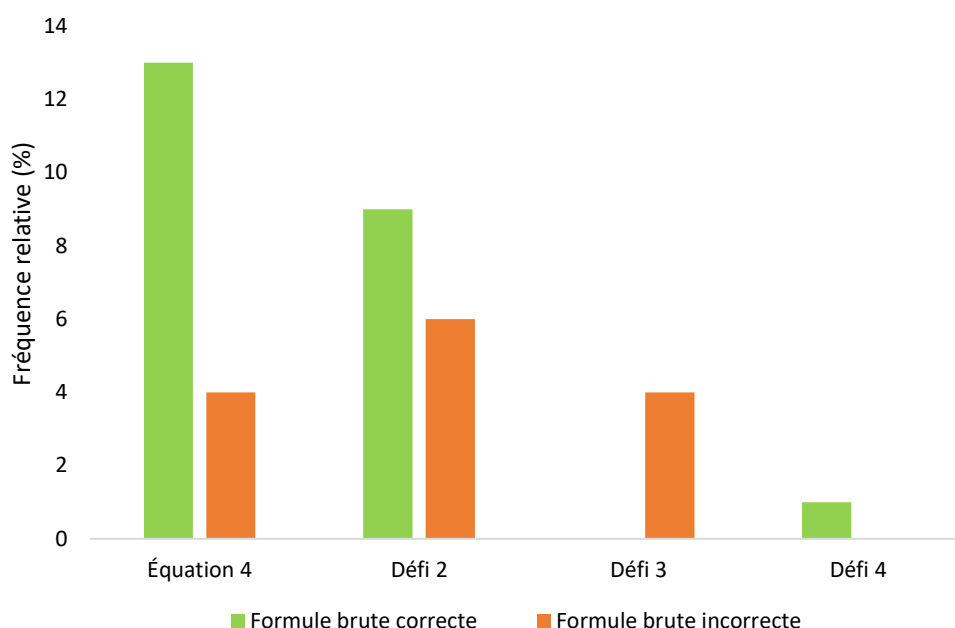


Figure 56 : Histogramme du nombre de vidéos réalisées par les élèves de 3^{ème} année de l'enseignement secondaire, représentant la formule brute correcte ou incorrecte pour les produits de l'équation 4, du défi 2 et du défi 4 et les réactifs du défi 3.

Avec la figure 57, on peut voir que la proportion de réponses correctes, pour l'équation 4 (bleu), est similaire dans le cas des groupes de troisième et de cinquième année. Pour les élèves de sixième, celle-ci a augmenté. Le cas est comparable pour le défi 3 (gris), il n'y a aucune formule brute correcte dans le cas des troisièmes et des cinquièmes, et 33% de formule brute correcte dans le cas des élèves de sixième. Pour le défi 4 (jaune), la réponse correcte est présente dans la totalité des vidéos¹⁷. Le cas particulier est dans le cas du défi 2 (orange). En effet, on peut remarquer que les élèves plus jeunes ont un meilleur taux de bonnes réponses que les élèves plus âgés.

¹⁷ Mais seul un groupe de troisième année et un de cinquième (1) année ont été jusqu'à ce défi

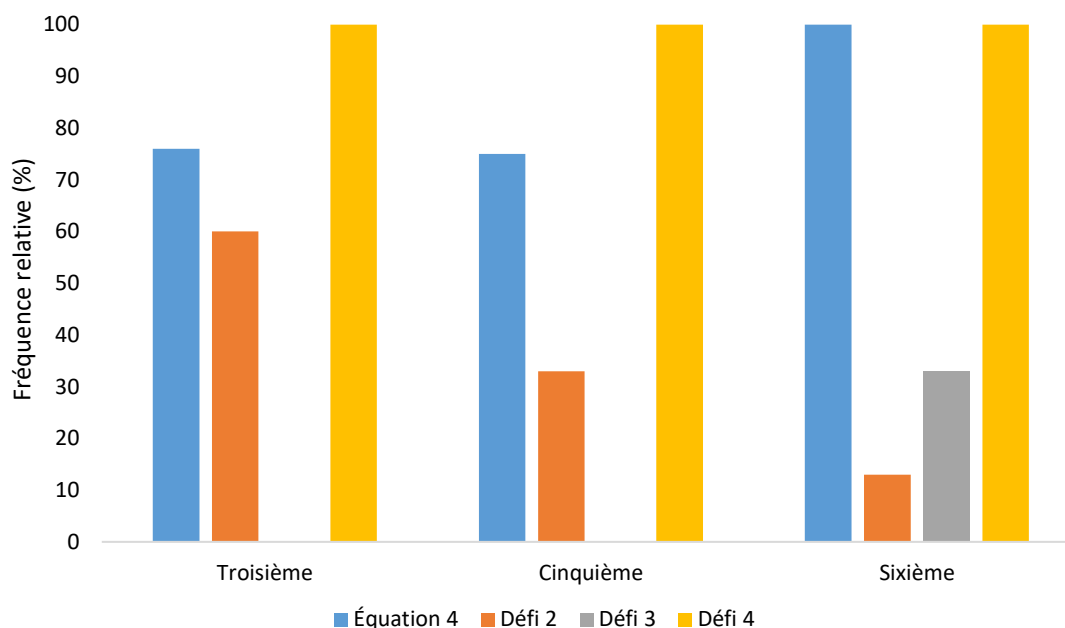


Figure 57 : Histogramme de la fréquence relative de vidéos réalisées par les élèves de l'enseignement secondaire représentant la formule brute correcte pour les produits de l'équation 4, du défi 2 et du défi 4 et les réactifs du défi 3.

Le tableau 9 présente les différentes formules brutes incorrectes prédites par les groupes.

Équation 4	$2(N + 3H)$	$2N + 6H$	N_2H_6	$N_2 + 6H$	$2N + 2H_3$
Défi 2	H_2O_2	H_4O_6	HO	H_8O_4	$O + 2H$
Défi 3	$2Fe + 3O$	$2Fe_2 + 3O_2$	$Fe_2 + O_3$	$Fe_2 + 3O$	$2Fe + O_3$

Tableau 9 : Retranscription des formules brutes incorrectes des représentations microscopiques des produits et des réactifs à prédire, issues des vidéos réalisées par les élèves testés.

Discussion

La prédiction des produits est relativement bien réussie dans le cas de l'équation 4 et du défi 4. Dans ces deux équations, un plus grand nombre d'indications étaient présentes, ce qui a facilité la tâche des élèves. Les coefficients stœchiométriques de l'équation 4 étaient notés pour les réactifs. Dans le cas du défi 4, tous les coefficients étaient indiqués et un seul des 2 produits était à prédire.

Le défi 2 a opposé plus de problèmes pour les élèves plus âgés. En effet, ils ont représenté le peroxyde d'hydrogène qui est également un produit possible. Ce n'est toutefois pas la réponse la plus simple et (surtout) celle que l'on trouverait en utilisant les valences ou la méthode du

chiasme. Cette réponse a donc probablement été induite par l'indication supplémentaire sur la carte.

Par contre, la prédiction de réactifs est un exercice très difficile pour les élèves de l'enseignement secondaire. Cet exercice n'est pas du tout été réussi par les élèves de troisième et de cinquième année. Dans le cas des élèves de sixième année, le taux de bonnes réponses est très faible. La prédiction de réactifs demande une certaine connaissance des molécules existantes dans les conditions standard. Par exemple, dans le défi 3, on écrira « Fe » et non « Fe_2 » dans le cas du fer et « O_2 » et non « O » ou « O_3 » pour l'oxygène. C'est probablement la raison pour laquelle le meilleur taux de réponse survient chez les élèves de sixième année qui sont plus avancés dans le cursus de chimie.

9.6. Mono-particulaire et multi-particulaire

Les élèves de l'enseignement secondaire ne réalisent pas de représentation multi-particulaire (le coefficient est compris comme une proportion) des réactions sauf s'ils y sont obligés (défi 2 : $H_{2(g)} + O_{2(g)} \rightarrow \dots$). Seul un groupe de sixième année (6.G2) a réalisé de son propre chef des réactions multi-particulaires pour les équations 1 et 2.

Dans le cas du défi 2, il leur était donné comme instruction : « Représenter à l'état initial 4 molécules de dihydrogène et 4 molécules de dioxygène ». Nous leur demandions donc de réaliser deux réactions simultanément et de laisser apparaître un excès en dioxygène.

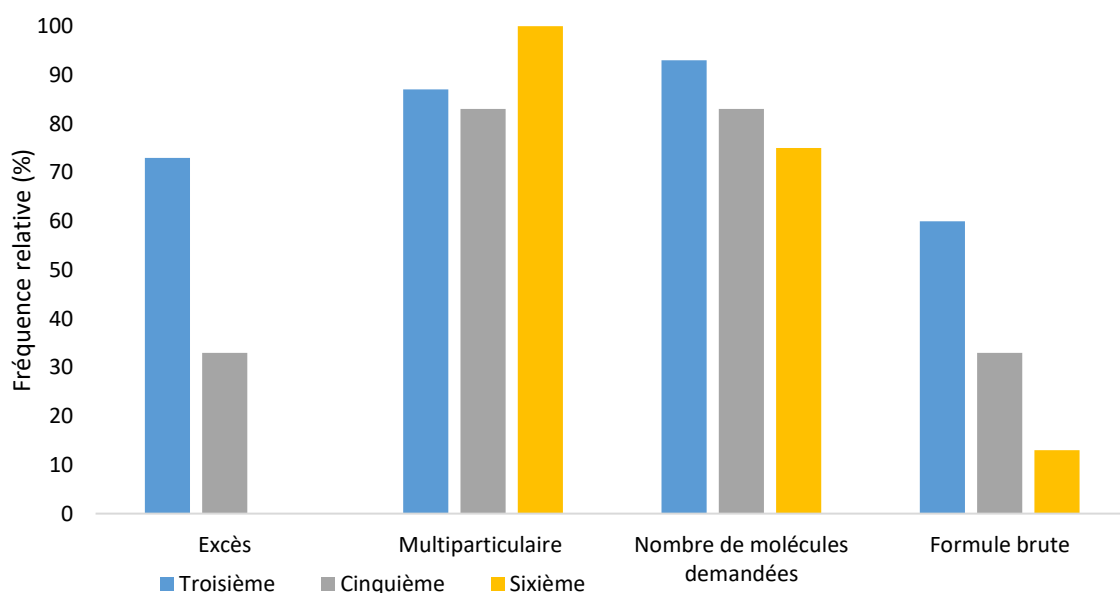


Figure 58 : Histogramme de la fréquence relative de groupes représentant, pour le défi 2, un excès en dioxygène, une réaction multi-particulaire, le nombre de molécules initiales demandées, et réalisant comme produits des molécules d'eau.

Par l'observation de la figure 58, nous pouvons voir certaines difficultés des élèves :

- Concernant l'excès : Aucun élève de sixième année n'a réalisé d'excès de réactifs. Tous les groupes, sauf 1 (6.G6.D2), ont réalisé des molécules de peroxyde d'hydrogène comme produit. Avec un tel produit formé, tous les réactifs ont donc réagi à la fin de la réaction. La majorité des élèves de cinquième année n'ont pas réalisé cet excès non plus, seul 33% des groupes l'ont représenté. Les élèves qui n'ont pas obtenu d'excès ont représenté des molécules de H_2O_2 ou des molécules hypothétiques de OH et de H_4O_4 , de manière à ce que tout ait donc réagi à la fin de la réaction. Les élèves de troisième année ont obtenu de meilleurs résultats : 73 % des vidéos ont représenté un excès en dioxygène, même si 60 % des groupes de troisième année ont obtenu l'eau comme produit.

- Dans le cas de la représentation multi-particulaire et la représentation du nombre de molécules demandées (4 molécules de dioxygène et 4 molécules de dihydrogène), les résultats sont nettement meilleurs. Les groupes qui n'ont pas réussi ces représentations sont ceux qui n'ont pas lu la consigne sur la carte ou qui ne l'ont pas comprise. Certains groupes (surtout chez les élèves de troisième année), ont représenté le bon nombre de molécules mais ont réalisé une réaction mono-particulaire (le coefficient est traduit par un nombre strict de molécules ou d'atomes) en laissant les autres molécules de côté (voir figure 59).

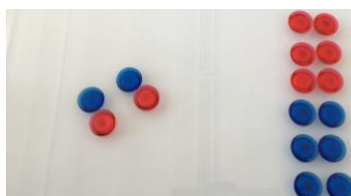


Figure 59 : Exemple de représentation contenant le nombre de molécules demandées mais ne réalisant pas de réaction multi-particulaire, un aimant rouge représente un atome d'oxygène et un aimant bleu représente un atome d'hydrogène (3.G17.D2)

D'autres groupes ont représenté quatre atomes d'hydrogène et quatre atomes d'oxygène (voir figure 60).



Figure 60 : Exemple de représentation ne contenant pas le nombre de molécules demandées, un aimant blanc représente un atome d'oxygène et un aimant orange représente un atome d'hydrogène (5.G7.D2)

Discussion

Globalement, le manque de représentation multi-particulaire (en dehors des vidéos représentant le défi 2) indique que peu d'élèves comprennent le coefficient stœchiométrique comme une proportion. Un excès est donc peu envisagé.

Par contre, si on leur impose ce type de représentation (défi 2), la majorité des élèves s'exécutent sans difficulté. Cela signifie donc que, pour induire cette définition du coefficient, il suffirait de travailler quelques exemples de ce type. Seuls certains élèves de troisième année sont récalcitrants à cette définition et restent bloqués à une représentation mono-particulaire.

Quelques groupes n'ont pas représenté le nombre de particules demandé dans le cas du défi 2. Pour beaucoup de groupes, la raison en est une confusion entre les notions d'atome et de molécule. Pour les autres groupes, ils n'ont pas lu les consignes indiquées sur la carte. Cela montre l'importance de lire les consignes d'un exercice avec les élèves pour qu'ils les prennent bien en compte.

L'apparition de l'excès dans les représentations est liée au respect de tous les autres objectifs.

10. Conclusions

Cette recherche nous a permis d'observer les conceptions du déroulement de réaction chimique au niveau microscopique d'élèves de l'enseignement secondaire. Pour cela, nous leur avons demandé de réaliser des vidéos dynamiques courtes de type slowmation. Cet outil peut donc être un outil de diagnostic de la représentation microscopique de la réaction chimique.

La technique du slowmation peut aider à éclairer une boîte noire pour les élèves débutants en chimie : la réaction chimique, et surtout son mécanisme intime. En effet, réaliser des représentations dynamiques de la réaction chimique permet de mettre en lumière des caractéristiques de ce concept qui sont souvent très vagues dans l'esprit des élèves (prise en compte du mouvement des particules, des collisions menant aux réactions chimiques, etc.).

Nous avons pu observer différentes conceptions erronées de la réaction chimique en lien avec la littérature scientifique et créer de nouvelles catégories de conceptions erronées.

Nous avons créé une typologie des collisions parmi laquelle se retrouvent certaines catégories déjà proposées chez certains auteurs. Cette typologie se découpe en quatre catégories : les collisions de type synchronisée, décalée de type I, décalée de type II et les collisions sans rupture de liaison ; la représentation majoritaire des élèves étant la collision de type I qui fait référence à une visualisation en étapes de la réaction chimique.

Ensuite, nous avons observé les deux catégories d'interprétation additive : la catégorie I et la catégorie II. Ces représentations sont particulièrement présentes au début du cursus mais disparaissent au fur et à mesure de l'apprentissage.

Grâce au côté dynamique de la représentation, nous avons pu observer le mouvement des particules. La représentation de type agent/action/patient est présente chez tous les groupes mais le patient n'est pas toujours un composé à l'état solide. L'état gazeux est souvent considéré en dissociant les atomes de la molécule. Cependant, nous avons pu observer que, de manière générale, les états de la matière étaient finalement peu pris en compte explicitement dans les représentations. Cela est peut-être dû à une limite de la technique du slowmation. En effet, demander à des élèves de représenter les états de la matière, qui est un concept macroscopique, au niveau microscopique pose problème, car cela nécessite de nombreuses particules à mouvoir ou simplement à représenter par des aimants.

La formule brute (la retranscription au niveau symbolique de la représentation iconique des produits dans les vidéos) et la représentation géométrique des molécules peuvent également être observées dans une activité de type slowmation. Nous avons pu voir, en lien avec d'autres auteurs, que, lorsqu'une équation n'est pas pondérée et qu'aucune consigne de pondération

n'est présente, entre 20 à 35 % des élèves ne la pondèrent pas. De plus, cette absence de pondération induit une mauvaise prédiction de réactifs ou de produits. La prédiction des réactifs pose par ailleurs le plus de problèmes chez les élèves. Par contre, le passage du niveau symbolique au niveau microscopique est assez bien maîtrisé par les élèves testés. Cependant, il existe certaines sources d'erreurs : la confusion entre coefficient et indice, la vue dissociative des molécules et la mauvaise prédiction de produits.

Nous avons repris la typologie des représentations correctes (alterné, décalé, linéaire et à plusieurs accroches) de Dehon (2018), mais nous avons ajouté une nouvelle typologie des représentations incorrectes : l'agrégat par bloc, l'agrégat moléculaire, l'agrégat dispersé et la forme dissociée. Ces catégories sont presque toutes présentes chez tous les groupes testés.

Le dernier point observé est la représentation de réactions en quantité stœchiométrique et non stœchiométrique. Aucun élève ne réalise d'excès ou de réaction multi-particulaire (sauf 1) lorsque aucune restriction ne l'y oblige. Le cas du défi 2, nous a permis de voir que la plupart des élèves peuvent comprendre le coefficient comme une proportion. Cependant, certains élèves de troisième secondaire n'arrivent pas à concevoir cette notion d'excès de réactifs. Cette vue multi-particulaire peut également être freinée par la technique du slowmation. En effet, cela constitue une deuxième limite de la technique : faire bouger beaucoup d'objets en même temps est fastidieux. Il serait donc difficile pour les élèves de réaliser des vidéos de réactions chimiques plus complexes (contenant plus de molécules ou d'atomes) que celles proposées dans cette recherche.

Globalement, il y a une amélioration des représentations de la réaction chimique de la troisième à la sixième année (par exemple, via la diminution de la représentation additive). Seul le défi 2 inverse la tendance et les élèves de sixième année ont de moins bons résultats.

Plusieurs perspectives sont envisageables pour cette recherche.

Tout d'abord, il serait peut-être intéressant de rendre possible la représentation des liaisons en les dessinant sur le tableau blanc ou en ajoutant des barreaux magnétiques. Ceci permettrait de faire la différence entre la représentation des états de la matière et la confusion entre indice et coefficient. Cela permettrait également, entre autres choses, d'avoir une idée de la représentation qu'ont les élèves de la liaison ionique.

Il serait également intéressant de réaliser un plus grand nombre de tests dans différentes écoles de la Fédération Wallonie-Bruxelles afin d'avoir une estimation plus générale de la représentation de la réaction chimique des élèves de l'enseignement secondaire en Belgique francophone. En effet, notre échantillon reste restreint et nous aimerions rassembler les conceptions possibles dans la tête des élèves de l'enseignement secondaire de manière

exhaustive. Il serait encore possible de réaliser des tests au début et en fin d'année scolaire avec les mêmes élèves afin de voir leur progression en fonction des savoirs enseignés. Le fait de se concentrer sur certains points du test (comme par exemple la pondération des équations chimiques, le type de collisions ou la prédiction de réactifs) pourraient aussi amener à de nouvelles conclusions intéressantes. Pour cela, il serait intéressant de réaliser des interviews avec les élèves après la réalisation de leurs vidéos afin d'avoir une plus grande précision sur leur raisonnement que via la feuille de description.

Cette activité pourrait faire l'objet de formations de professeurs de chimie. Ceci afin de leur donner un outil de diagnostic des représentations de la réaction chimique dans la tête de leurs élèves, mais également de difficultés entourant la conversion de symboles en représentations microscopiques.

11. Références

- ABRAHAM M.R., GRZYBOWSKI E.B., RENNER J.W. & MAREK E.A. (1992). Understandings and misunderstandings of eighth graders of five chemistry concepts found in textbooks. *Journal of Research in Science Teaching*, 29(2), 105 - 120.
- ABRAHAM M.R., WILLIAMSON V.M. & WESTBROOK S.L. (1994). A cross-age study of the understanding of five chemistry concepts. *Journal of Research in Science Teaching*, 31(2), 147 - 165.
- Action Médias Jeunes, 2016. [En ligne]
Available at: <http://www.actionmediasjeunes.be/formations/realiser-film-stop-motion/>
[Accès le 08 Mai 2018].
- BEN-ZVI R., EYLOB B-S. & SILBERSTEIN J. (1987). Students' visualisation of a chemical reaction. *Education in Chemistry*, 24(4), 117 - 120.
- Cambridge dictionary, 2018. [En ligne]
Available at: <https://dictionary.cambridge.org/fr/dictionnaire/anglais/slow-motion>
[Accès le 4 décembre 2018].
- CARRETTO J. & VIOVY R. (1994). Relevé de quelques obstacles épistémologiques dans l'apprentissage du concept de réaction chimique. *ASTER*, n°18, 10 - 26.
- CHENG M.W. (2018). Students'visualisation of chemical reactions-insights into the particle model and the atomic model. *Chemistry Education Research and Practice*, n°19, 227 - 239.
- DEHON J. & SNAUWAERT P. (2015). 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, 209 - 235.
- DEHON J. (2018). L'équation chimique, un sujet d'étude pour diagnostiquer les difficultés d'apprentissage de la langue symbolique des chimistes dans l'enseignement secondaire belge (thèse de doctorat). *Namur : PUN*
- Fédération Wallonie-Bruxelles. (2016). *Les indicateurs de l'enseignement 2016*. Administration générale de l'Enseignement, Service général du Pilotage du Système éducatif, Bruxelles. [En ligne]
Available at: <http://www.enseignement.be/index.php?page=0&navi=2264>
[Accès le 7 décembre 2018].

- GAUCHON L. (2005). Transformation chimique : conceptions des élèves / notion de réactif limitant. *Bulletin de l'Union des professeurs de physique et de chimie*, n°99, 733 - 746.
- HINTON M. & NAKHLEH M. (1999). Students' Microscopic, Macroscopic, and Symbolic Representations of Chemical Reactions. *Chem. Educator*, n°4, 158 - 167.
- HOBAN G. (2005). From claymation to slowmation : A teaching procedure to develop students' science understandings. *Teaching Science*, 51(2), 26 - 30.
- HOBAN G. & NIELSEN W. (2012). Using “Slowmation” to Enable Preservice Primary Teachers to Create Multimodal Representations of Science Concepts. *Research In Science Education*, 42(6), 1101 - 1119.
- JOHNSTONE A.H. (1982). Macro- and microchemistry. [Notes and correspondence]. *School Science Review*, n°64, 377 - 379.
- JOHNSTONE A.H. (1991). Why is science difficult to learn? Things are seldom what they seem. *Journal of Computer Assisted Learning*, n°7, 75 - 83.
- KAM-WAH LEE L. (1999). Particulate Representation of a Chemical Reaction Mechanism. *Research in Science Education*, 29(3), 401 - 415.
- KERIM K. (2013). *youtube*. [En ligne]
Available at: https://www.youtube.com/watch?v=DLs_zxYkG0k
[Accès le 15 novembre 2018].
- KERMEN I. & MEHEUT M. (2009). Different models used to interpret chemical changes: analysis of a curriculum and its impact on French students' reasoning. *Chemistry Education Research and Practice*, n°10, 24 - 34.
- LAUGIER A. & DUMON A. (2000). TP en chimie et représentation de la réaction chimique par l'équation bilan dans les registres macro et microscopique : une étude en classe de seconde (15-16 ans). *Chemistry education : research and practice in Europe*, 1(1), 61 - 75.
- MZOUGH-KHADHRAOUI I. & DUMON A. (2012). L'appropriation par des élèves tunisiens débutants du langage permettant de représenter la réaction chimique. *Recherches en didactique des sciences et des technologies*, n°6, 89 - 118.
- NAKHLEH M.B. (1992). Why Some Students Don't Learn Chemistry. *Journal of Chemical Education*, 69(3), 191 - 196.

ParuVendu, [En ligne]

Available at: <https://www.paruvenu.fr/immobilier/I/enlever-la-rouille-du-fer-forge-i30623>

[Accès le 6 novembre 2018].

PIRSON P., BRIBOSIA A., SNAUWAERT P., TADINO A., VAN ELSUWE R. (2018).

Chimie 6^e. *Louvain-La-Neuve : De Boeck*.

SOLOMONIDOU C. & STAVRIDOU H. (1994). Les transformations des substances, enjeu de l'enseignement de la réaction chimique. *ASTER*, n°18, 75 - 95.

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

TABER K. (2013). Revisiting the chemistry triplet: drawing upon the nature of chemical knowledge and the psychology of learning to inform chemistry education. *Chemistry Education Research and Practice*, n°14, 156 - 168.

TALANQUER V. (2010). Macro, Submicro, and Symbolic : The many faces of the chemistry “triplet”. *International Journal of Science Education*, 33(2), 179 - 195.

Wikipédia, [En ligne]

Available at: https://fr.wikipedia.org/wiki/Animation_en_volume

[Accès le 6 novembre 2018].

YARROCH W.L. (1985). Student understanding of chemical equation balancing. *Journal of Research in Science Teaching*, 22(5), 449 - 459.

YITBAREK S. (2011). Chemical reaction : diagnosis and towards remedy of misconceptions. *Australian Journal of Clinical Education*, n°1, 10 - 28.

12. Annexes

Annexe 1: Feuille de consignes donnée aux élèves

Annexe 2: Feuille de description donnée aux élèves

Annexe 3: Feuille de brouillon donnée aux élèves

Annexe 4: Application « Stop Motion Studio »

Annexe 5: Tableau des équations utilisées

Les vidéos cités dans ce travail sont disponibles via le lien :

<https://medias.unamur.be/channels/#memoire-justine-simon>

Apprendre la Chimie avec le Slowmation

1. But

Le but est de faire des vidéos en slowmation de réactions chimiques à partir d'équations chimiques en utilisant l'application « Animation en volume ».

2. Matériel

- Tablette
- Tableau blanc
- Aimants
- Feuille de description

3. Consignes de travail

- Faire des vidéos d'au moins 5 secondes. C'est-à-dire qu'il faut au minimum **25 photos par film**.
- 1 équation est donnée à la fois. **Quand votre film est terminé, vous m'appellez**, je viens verrouiller la vidéo et je vous donne la prochaine équation.
- Il y a 4 équations possibles donc 4 vidéos.
- Nommez votre vidéo par le numéro de votre équation.

4. Explication de l'application « Animation en volume »

4.1. Comment lancer l'application ?

Pour mettre en route l'application, aller sur une des pages de l'écran d'accueil de la tablette et appuyer sur l'icône de la figure 1.



Figure 61 : Icône de l'application

4.2. Comment commencer un nouveau film ?

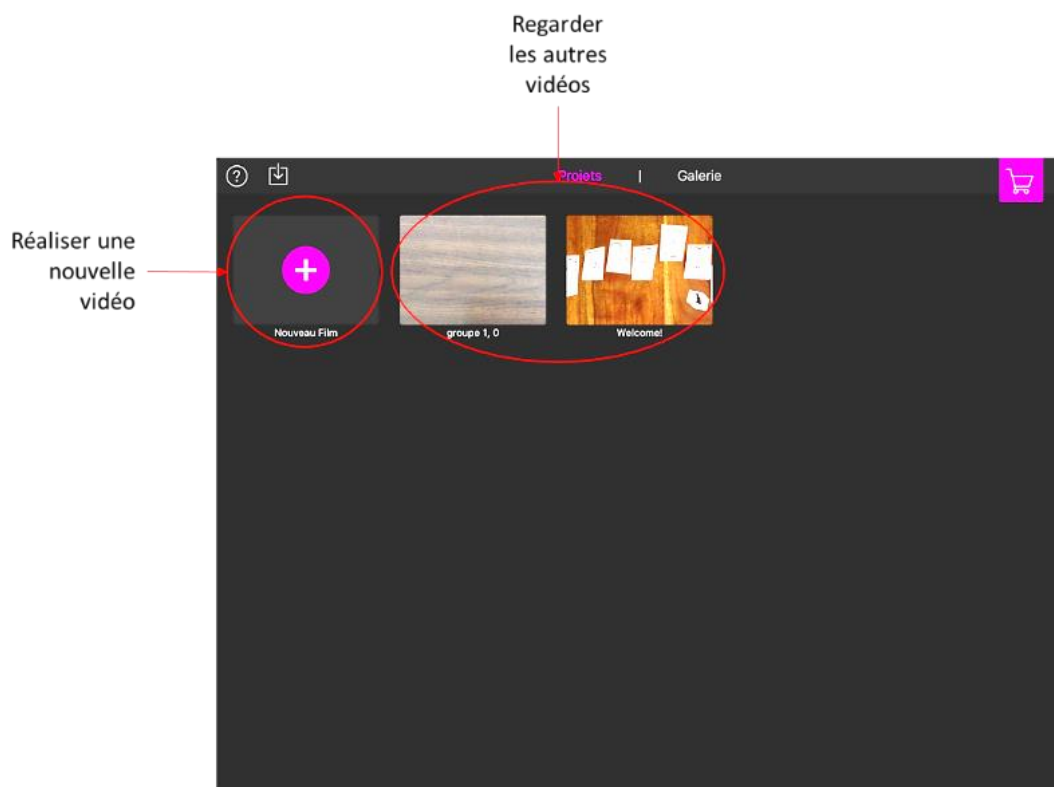


Figure 62 : Page d'accueil de l'application

4.3. Comment prendre des photos ?

Appuyez sur le bouton rouge pour prendre les photos.

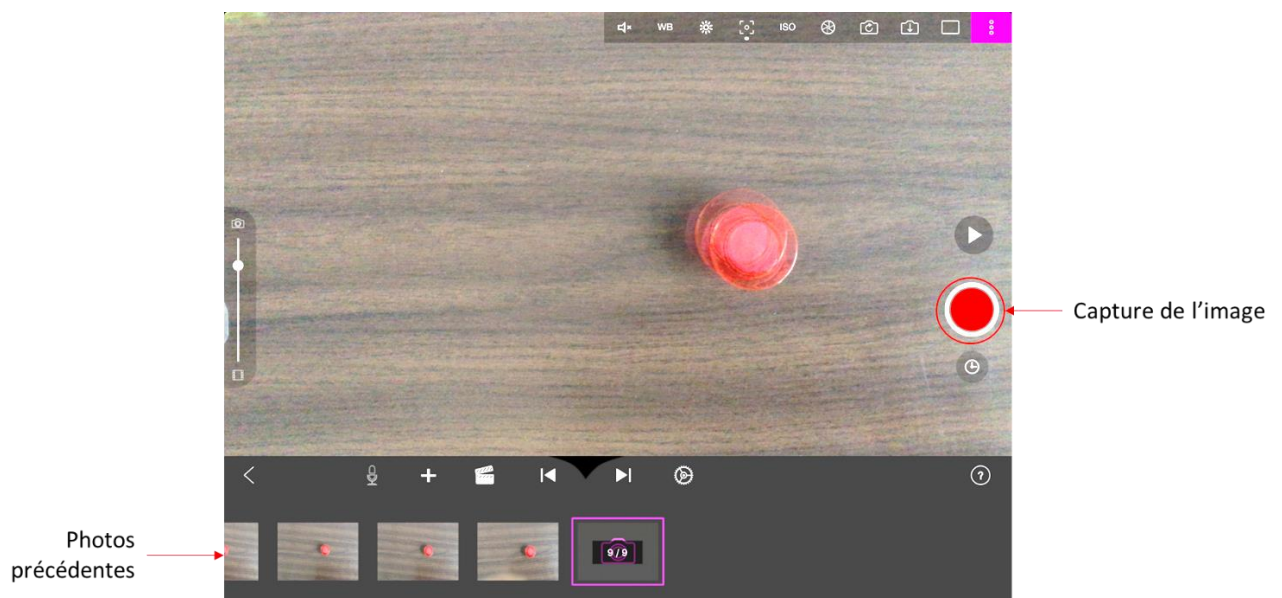


Figure 63 : Page de création d'une vidéo

4.4. Où étaient les aimants sur l'image précédente ?

Vous pouvez superposer à votre image actuelle la dernière photo prise afin de connaître la position exacte des aimants. Pour cela, faites glisser le point sur la barre de l'icône à gauche de l'écran vers le bas pour voir apparaître l'image précédente (voir figure 4). Plus vous faites progresser le point vers le bas, plus l'image précédente devient nette et l'image en cours disparaît.

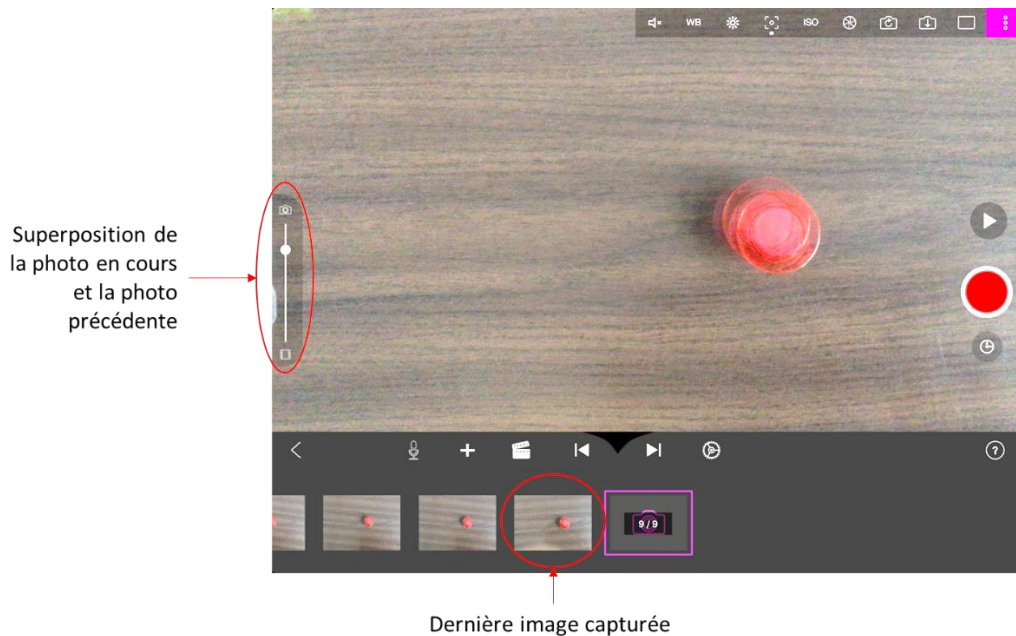


Figure 64 : Superposition de l'image précédente et l'image actuelle

4.5. A quoi servent les autres icônes ?

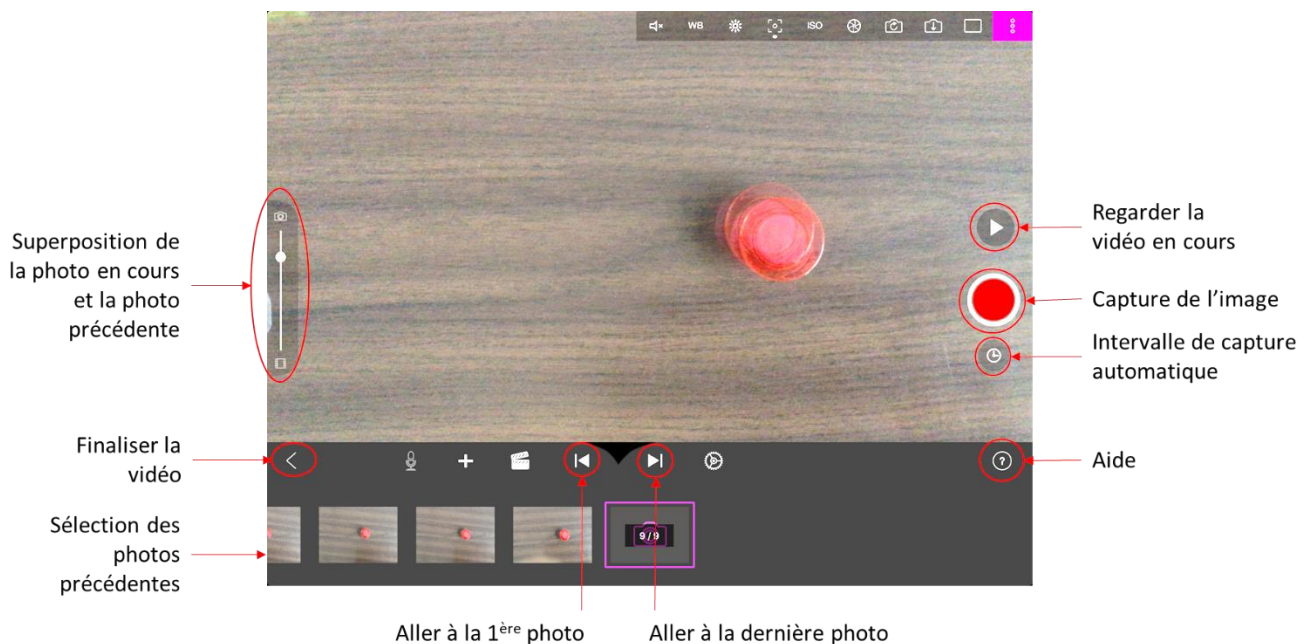
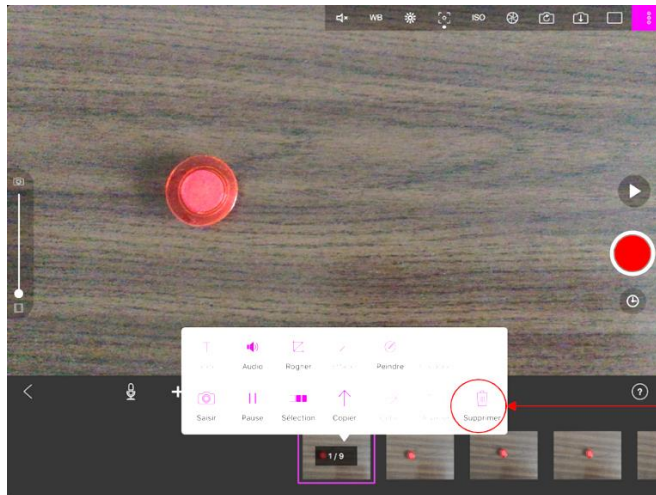


Figure 65 : Résumé de toutes les icônes que vous pouvez utiliser à partir de cet écran

4.6. Comment supprimer une image ?

Lorsque vous appuyez sur une photo de la figure 5, vous arrivez à une page de montage de la vidéo (figure 8). Vous pouvez supprimer la photo sélectionnée en appuyant sur l'icône entourée de la figure 6.



Supprimer
une photo

Figure 66 : Page de montage d'une vidéo

4.7. Que puis-je faire d'autre avec mes photos ?

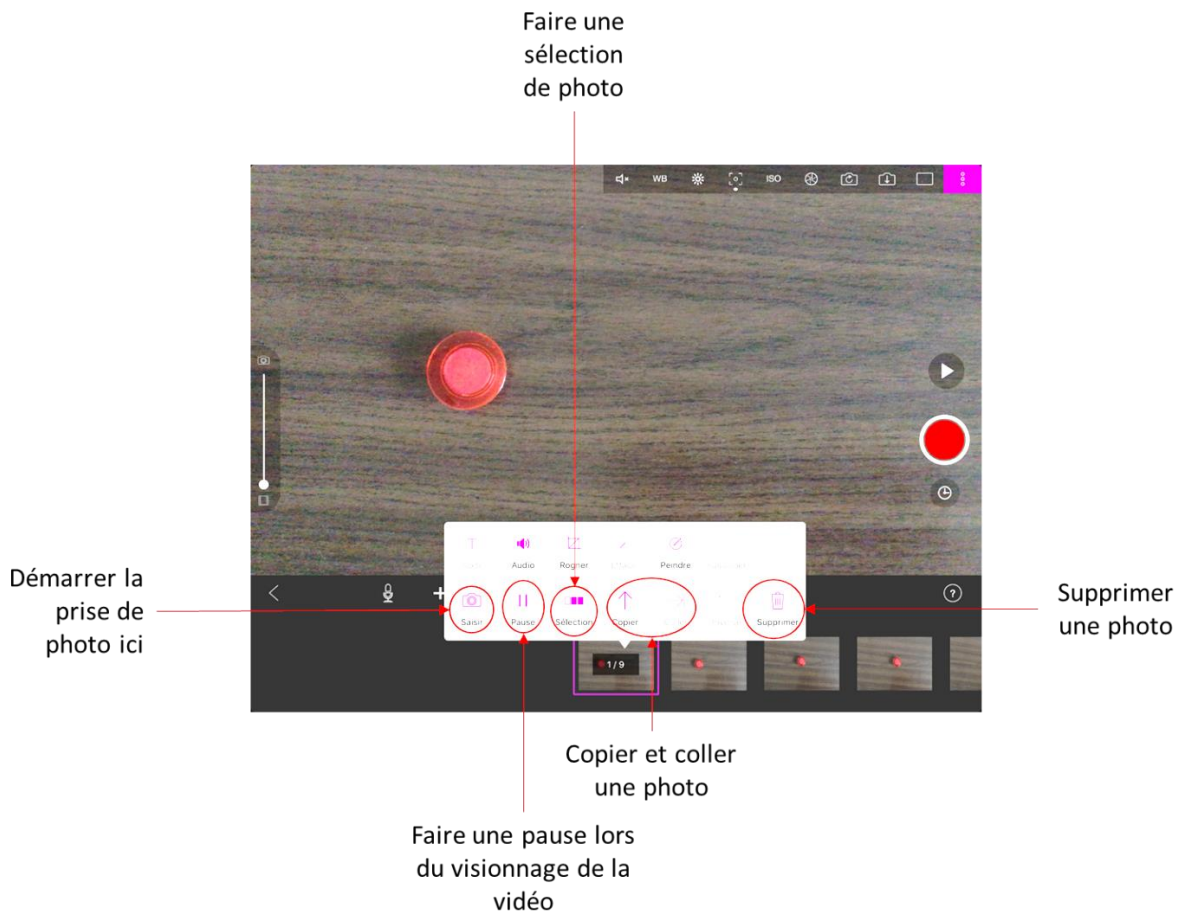


Figure 67 : Explication de toutes les possibilités de modification des photos que vous avez prises

4.8. Comment terminer une vidéo ?

Quand vous avez terminé votre vidéo, appuyez sur la flèche en bas à gauche de l'écran (voir figure 5).

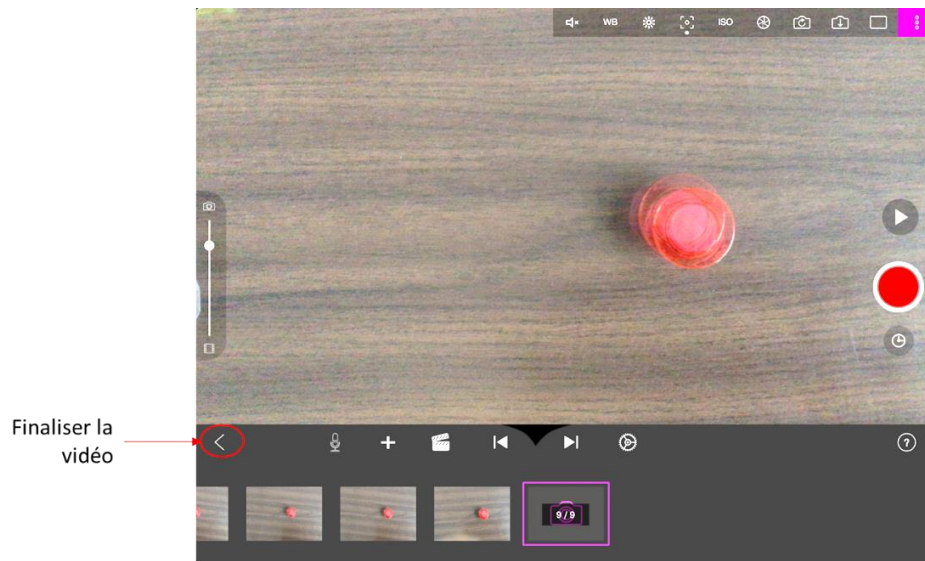


Figure 68 : Schéma pour finaliser la vidéo

Vous arrivez alors sur l'écran de l'image suivante (figure 9).

Changez le nom de votre vidéo en appuyant sur le nom. Nommez-la par le numéro de votre équation. Par exemple : Équation 1.

Ensuite, appelez-moi afin que je verrouille votre vidéo et que je vous donne l'équation suivante.

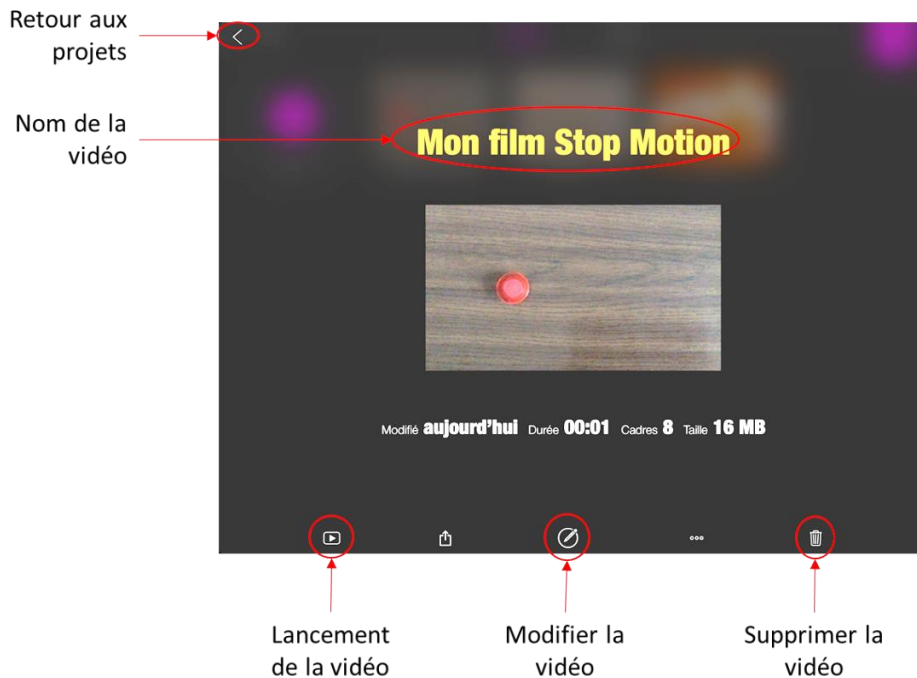


Figure 69 : Page de finalisation d'une vidéo « Mon film Stop Motion »

Bon travail !

Annexe 2: Feuille de description donnée aux élèves

Feuille de description

Numéro de la tablette :

Équation 1	
Couleur de l'aimant (C) : Description :	(O) :
Équation 2	
Couleur de l'aimant (H) : Description :	(I) :
Équation 3	
Couleur de l'aimant (Al) : Description :	(O) :
Équation 4	
Couleur de l'aimant (N) : Description :	(H) :

Défi 1		
Couleur de l'aimant (S) :	(O) :	
Description :		
Défi 2		
Couleur de l'aimant (H) :	(O) :	
Description :		
Défi 3		
Couleur de l'aimant (Fe) :	(O) :	
Description :		
Défi 4		
Couleur de l'aimant (C) :	(H) :	(O) :
Description :		

Annexe 3: Feuille de brouillon donnée aux élèves

Feuille de brouillon

Numéro de la tablette :

Annexe 4: Application « Stop Motion Studio »

L'application « Stop Motion Studio¹⁸ » (figure 1) est une application gratuite (avec des fonctionnalités supplémentaires payantes) disponible sur iOS, Mac, Android et Windows. Elle permet de transformer rapidement et facilement une série de photos prises avec l'application en film. Il est possible de régler la vitesse de défilement d'images afin de se rapprocher d'un film en slowmotion ou d'avoir un défilement d'images plus rapide afin d'obtenir un film en stopmotion.

À ce film, il est possible d'ajouter un enregistrement, une bande sonore. Il est également possible d'ajouter une série de sons ou musiques existant sur la plateforme mais cela fait partie des fonctions payantes.

Dans ces fonctions payantes (figure 1), il y a également la possibilité d'ajouter : des images importées, un thème (générique de début et/ou de fin par exemple), des dessins au marqueur sur les photos, des effets cinématographiques, un fond d'écran (similaire à un écran vert), ou encore de la rotoscopie (création d'animation).

Lorsque la vidéo est terminée, il est possible de l'exporter hors de l'application sous format Movie, en GIF Animé, en images, en folioscope ou sous format de projet.

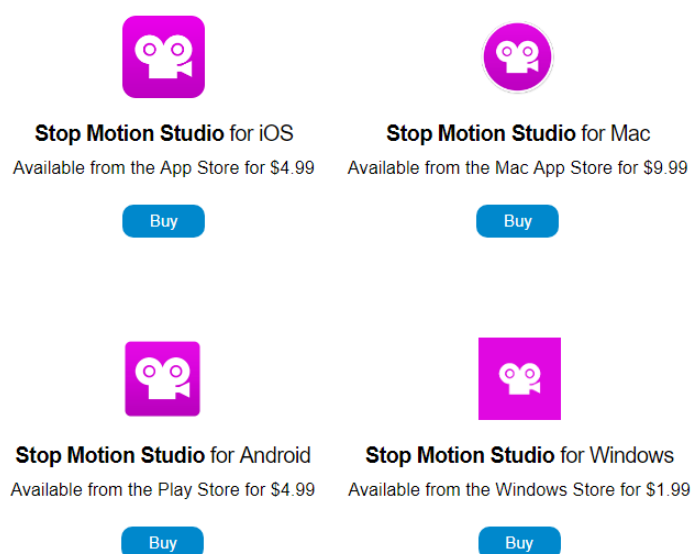


Figure 70 : Représentation des différents logos possibles de l'application Stop Motion Studio en fonction de la plateforme utilisée et le prix du pack des autres fonctionnalités (Stop Motion Studio, 2018).

¹⁸ Stop Motion Studio [En ligne]
Available at : <https://www.cateater.com/>
[Accès le 12 Décembre 2018]

Annexe 5 : Tableau des équations utilisées

Équation 1	$C + O_2 \rightarrow CO_2$
Équation 2	$H_2 + I_2 \rightarrow 2 HI$
Équation 3	$4 Al_{(s)} + 3 O_{2(g)} \rightarrow 2 Al_2O_{3(s)}$
Équation 4	$N_{2(g)} + 3 H_{2(g)} \rightarrow$
Défi 1	$S_{(s)} + O_{2(g)} \rightarrow SO_{3(l)}$
Défi 2	$H_{2(g)} + O_{2(g)} \rightarrow \dots$
	Représenter à l'état initial 4 molécules de dihydrogène et 4 molécules de dioxygène
Défi 3	$\dots + \dots \rightarrow Fe_2O_{3(s)}$
Défi 4	$CH_4 + 2 O_2 \rightarrow CO_2 + 2 \dots$

Tableau : Liste des équations données aux élèves de l'enseignement secondaire.