

UNIVERSITE DE YAOUNDE I

CENTRE DE RECHERCHE ET DE
FORMATION DOCTORALE EN
SCIENCES HUMAINES, SOCIALES
ET EDUCATIVES

UNITE DE RECHERCHE ET DE
FORMATION DOCTORALE EN
SCIENCES DE L'EDUCATION ET
INGENIERIE EDUCATIVE



THE UNIVERSITY OF YAOUNDE I

POST GRADUATE SCHOOL FOR
SOCIAL AND EDUCATIONAL
SCIENCES

RESEARCH AND DOCTORAL
TRAINING UNIT FOR SCIENCE OF
EDUCATION AND EDUCATIONAL
ENGINEERING

**ENSEIGNEMENT/APPRENTISSAGE DE LA CHIMIE :
CONCEPTIONS DES APPRENANTS DE 3^{ÈME} EN TLE DE
L'ENSEIGNEMENT SECONDAIRE GENERAL
CAMEROUNAIS SUR LE CONCEPT DE
STOECHIMETRIE**

Mémoire de Master en Science de l'Education, Spécialité Didactique de la Chimie Soutenu le 26
Juillet 2023.

Par :

TEMATIO WOUKENG Joséphine Nita

21V3747

Sous la direction de :

AYINA BOUNI, Maître de conférences à l'Université de Yaoundé

Jury

NKENGFACK Augustin

Professeur

NTEDE NGA

Maître de Conférences

Université de Yaoundé

Université de Yaoundé

Président

Examineur



Avertissement

Le centre de recherche et de formation Doctorale en science humaine sociale et Educative de l'Université de Yaoundé I n'entend donner aucune approbation ni improbation aux opinions émises dans ce mémoire ; ces opinions doivent être considéré comme propre à leur auteur

DEDICACE

A mes très chers parents M. WOUKENG Alain et Mme FEULEACK Elisabeth 

REMERCIEMENTS

“Je puis tout par celui qui me fortifie” Ph4, 13

La rédaction du présent mémoire n'aurait pas été possible sans le secours de certaines personnes à qui je voudrais adresser des remerciements particuliers. Il s'agit:

Des différents chefs d'établissements dans lesquels j'ai pu effectuer l'expérimentation d'où découlent les résultats présentés dans ce travail.

Du Pr Bela cyrille, doyen de la faculté des sciences de l'éducation

Du chef de département de didactique Pr NKECK Renée.

Des différents enseignants de la faculté des sciences de l'éducation et en particulier ceux du département de didactique pour leurs enseignements et leur encadrement tout au long de mon cursus dans cette institution

Du Pr Ayina Bouni, qui a bien voulu diriger ce travail et m'a permis de le mener à son terme.

Je remercie le Dr Awomo pour le coaching, pour sa disponibilité, sa patience, ses précieux conseils.

De tous les professeurs de lycées m'ayant permis d'effectuer on experimentation dans leurs salles de cours respectives ainsi que toutes les personnes qui par leurs paroles, leurs écrits, leurs conseils et leurs critiques ont guidé mes réflexions et ont accepté de me rencontrer et de répondre à mes questions durant mes recherches.

Des membres du jury pour avoir accepté d'évaluer mon travail et lu les pages de mon manuscrit. Leurs suggestions contribueront indubitablement à l'amélioration de sa qualité scientifique.

De mes parents M. WOUKENG Alain et Mme FEULEFACK Elisabeth, ma grand-mère Mme FEULEFACK Marie, mes frères et soeurs: WOUKENG Yvan, WOUKENG Hervé, WOUKENG Gladice et WOUKENG Reine, ainsi que tous les autres membres de ma famille élargie. Je leur sais gré pour leur amour inconditionnel et leur soutien multiforme.

De la famille DONGMO à Yaoundé pour son soutien, ses conseils, son encadrement durant tout mon parcours. Qu'elle trouve ici l'expression de ma profonde gratitude.

Enfin, tous ceux qui de près ou de loin ont oeuvré, en acte, en pensée ou même en prière à l'aboutissement de ce travail. Le Seigneur saura vous le rendre.

Table des matières

DEDICACE.....	i
REMERCIEMENTS.....	iv
LISTE DES ABREVIATIONS.....	ix
LISTE DES TABLEAUX	x
LISTE DES FIGURES.....	xi
RESUME.....	xii
ABSTRACT	xiii
Introduction générale.....	xiii
CHAPITRE 1 : PROBLEMATIQUE DE L'ETUDE	4
1.1. Contexte et justification	5
1.2. Pertinence scientifique	8
1.3. Pertinence pédagogique	9
1.4. Position et formulation du problème.....	9
1.4.1. Les constats	9
1.4.2. Problème.....	10
1.5. Les questions de recherche	12
1.6. Les hypothèses de recherche.....	14
1.7. Objectifs de recherche.....	14
1.7.1. Objectif général	14
1.7.2. Objectifs spécifiques.....	14
1.8. Délimitation géographique de l'étude.....	15
Chapitre 2 : Insertion théorique de l'étude.....	16
2.1. Etat des lieux sur les conceptions	17
2.1.1. Emergence et définition du concept.....	17
2.1.2. Les conceptions au sens de Giordan et De Vecchi (1987)	18
2.1.3. Les origines des conceptions	20
2.2. La nature de la chimie.....	21
2.2.1. Le langage de la chimie : expliquer du visible par de l'invisible compliqué	21
2.2.2. La théorie atomique comme fondement des différents registres de représentation des chimistes	22
2.2.3. Les niveaux de formulation de la transformation chimique.....	23
2.3. Les registres de représentation des savoirs en chimie.....	24

2.3.1. Le « chemistry triplet » de Johnstone (1982, 1991)	24
2.3.2. Le tétraèdre de Kermen et Meheut.....	27
2.3.3. Modèle des niveaux de signification de Dehon (2018)	31
2.4. Enquête épistémologique sur le concept de stœchiométrie	33
2.4.1. Naissance de la stœchiométrie	33
2.4.2. La conservation de la matière : théorie nouvelle pour la systématisation de la chimie ..	37
2.4.3. Stœchiométrie et réémergence de la théorie atomique.....	38
2.4.4. Dépassement de la loi des proportions multiples	40
2.4.5. De la nécessité de simplifier les symboles des « corps simples ».....	42
2.4.6. Le scepticisme d'Oswald face à la théorie atomique et le concept de mole.....	44
2.4.7. La détermination du nombre d'Avogadro	45
2.4.8. La stœchiométrie aujourd'hui.....	46
2.5. Revue de la littérature.....	47
2.1. Suffit-il de savoir équilibrer les équations bilan de réaction pour maîtriser la stœchiométrie ?	47
2.2. Stœchiométrie et théorie des niveaux de signification.....	50
2.3. Stœchiométrie et expérimentation	51
Chapitre 3 : Etude de la transposition didactique du concept de stœchiométrie en classe de 3^{ième} de l'enseignement secondaire général Camerounais.....	53
3.1. Du savoir savant au savoir enseigné	53
3.2. Les contraintes de la transposition didactique	54
3.3. Analyse de la transposition didactique du concept de stœchiométrie dans le programme, le manuel scolaire puis les notes de cours des enseignants de la classe de troisième.....	56
3.3.1. Analyse descriptive des programmes des classes de 4 ^{ième} et 3 ^{ième} de l'enseignement secondaire général Camerounais	56
3.3.2. Analyse de la présentation du savoir relatif à la réaction chimique dans le manuel scolaire officiel de la classe de troisième.....	57
3.3.2.1. La définition des concepts de réaction chimique, réactif et produit dans le manuel de 3 ^{ième}	58
3.3.2.2. Transposition de la loi de conservation de la matière dans le manuel de 3 ^{ième}	59
3.3.2.3. Le symbolisme de la réaction chimique dans le manuel de 3 ^{ième}	60
3.3.2.4. Transposition de la stœchiométrie dans le manuel de 3 ^{ième}	60
3.4. Analyse de la transposition didactique du concept de stœchiométrie par les enseignants de 3 ^{ième} de l'enseignement secondaire général.....	63
3.4.1. Cadre d'analyse	63
3.4.2. Recueil et analyse des données	64
3.4.3. Présentation des résultats et analyse.....	64
3.4.3.1. Identification des enseignants auteurs des cours	64

3.4.3.2. Définition des concepts de réaction chimique, réactif et produit dans les notes de cours des enseignants de 3 ^{ième}	64
3.4.3.3. Transposition de la loi de conservation de la matière par les enseignants de 3 ^{ième} ...	66
3.4.3.4. Transposition didactique du symbolisme de la réaction chimique par les enseignants de 3 ^{ième}	66
3.4.3.5. Transposition de la stœchiométrie par les enseignants de 3 ^{ième}	67
Chapitre 4 : Méthodologie de l'étude	70
4.1. Type de recherche et échantillon.....	71
4.2. Technique de collecte des données	72
4.2.1. Elaboration et validation du questionnaire.....	72
4.2.2. Présentation du test et analyse a priori	73
4.2.2.1. Analyse de l'activité 1	73
4.2.2.2. Analyse de l'activité 2.....	74
4.2.2.3. Analyse de l'activité 3.....	75
4.2.2.4. Analyse de l'activité 4.....	76
4.2.2.5. Analyse de l'activité 5.....	77
4.2.2.6. Analyse de l'activité 6.....	79
4.2.2.7. Analyse de l'activité 7.....	82
4.2.2.8. Analyse de l'activité 8.....	83
4.2.2.9. Analyse de l'activité 9.....	84
CHAPITRE 5 : PRESENTATION ET ANALYSE DES RESULTATS	86
5.1. Résultats et analyse	87
5.1.1. Equilibrage des équations bilan de réaction	87
5.1.2. Composition constante des composés	90
5.1.3 Signification du coefficient stœchiométrique	91
5.1.4. Conservation des éléments au cours d'une réaction chimique.....	92
5.1.5. Mélange stœchiométrique et détermination de la quantité de matière de produit formé connaissant la quantité de matière initiale d'un réactif.....	95
5.1.5.1. Mélange stœchiométrique au niveau macroscopique.....	95
5.1.5.2. Mélange stœchiométrique au niveau microscopique.....	99
5.1.5.3. Détermination de la quantité de matière de produit formé connaissant la quantité d'un réactif consommé.....	101
5.1.6. Signification du coefficient stœchiométrique et détermination de la quantité de matière d'un produit à partir d'un mélange non stœchiométrique	103
5.1.6.1. Signification du coefficient stœchiométrique	103
5.1.6.2. Détermination de la quantité de matière de produit formé à partir d'un mélange non stœchiométrique	106
5.1.6.3. Détermination du nombre de molécules à partir de la quantité de matière	110

5.1.7. Loi de conservation de la matière	111
5.1.8. Unité de décompte des particules mises en jeu au cours d'une réaction chimique	113
5.1.9. Niveau de représentation de la réaction chimique chez les apprenants	118
5.2. Discussion	121
5.3. Suggestions	125
Conclusion et perspectives	127
Bibliographie.....	131
ANNEXE: QUESTIONNAIRE ADRESSE AUX ELEVES	Erreur ! Signet non défini.

LISTE DES ABREVIATIONS

- 1^{ière} : classe de première
2^{nde} : classe de seconde
3^{ième} : classe de troisième
BEPC : Brevet d'étude de premier cycle
DSCE : document de stratégies de croissance économique
PCT : physique chimie technologie
Tle : classe de terminale

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1: Identification des enseignants auteurs des cours analysés	64
Tableau 1: fréquences des différentes catégories de réponses des élèves à la première question cas a	87
Tableau 2: Fréquences des différentes catégories de réponse des élèves à la première question cas b	88
Tableau 3: Fréquences des différentes catégories de réponses des apprenants à la deuxième question	90
Tableau 4: fréquences des différentes catégories de réponses des élèves à la troisième question	91
Tableau 5: Fréquences des différentes catégories de réponses des élèves à la quatrième question	93
Tableau 6: Fréquences des différentes catégories de réponse des élèves à la cinquième question	95
Tableau 7: fréquences des différentes catégories de réponses des élèves à la sixième question	99
Tableau 8: Fréquences des différentes catégories de réponses des élèves à la septième question	101
Tableau 9: Fréquences des différentes catégories de réponses des apprenants à la huitième question	103
Tableau 10: Fréquences des différentes catégories de réponses des apprenants à la neuvième question	106
Tableau 11: fréquences des différentes catégories de réponses des apprenants à la dixième question	110
Tableau 12: fréquences des différentes catégories de réponses des apprenants à la onzième question	112
Tableau 13: fréquences des différentes catégories de réponses des apprenants à la douzième question	113
Tableau 14: fréquences des différentes justifications des apprenants à la douzième question	114
Tableau 15: croisement des réponses et justifications des apprenants à la douzième question	115
Tableau 16: fréquences des différentes catégories de réponses des élèves à la treizième question:	118

LISTE DES FIGURES

Figure 1: triangle de Johnstone (ou chemistry triplet) représentant les trois niveaux de savoir (levels of knowledge) en chimie : macroscopique, microscopique et symbolique (Johnstone, 1993).....	25
Figure 2: Représentation des trois niveaux de savoir de la chimie (version du « chemistry triplet »), de leurs modes de représentation et de leurs connexions (d’après Houart, 2009).	26
Figure 3: Tétraèdre représentant quatre niveaux de savoir en chimie : empirique, macroscopique, microscopique et symbolique (Kermen et Méheut, 2009).	27
Figure 4: Schéma des niveaux de signification associés à une visualisation pour un jeune apprenant de chimie. (Dehon 2018, p. 110)	32
Figure 5: Schéma des niveaux de signification et exemples de significations associés au symbole « Na » (Dehon 2018, p. 111)	33
Figure 1: Représentation des éléments et des substances par Dalton tiré de Dalton (1808, P.561)	40
Figure 1: Activité amorçant l'équilibrage d'une équation bilan dans le manuel Dewatek. p. 25	60
Figure 2: transposition de l'exploitation d'une équation bilan dans le manuel de 3 ^{ième}	62
Figure 3: identification des réactifs et des produits dans les notes de cours d'un enseignant ..	65
Figure 4: illustration de la loi de Lavoisier par un enseignant de 3 ^{ième}	66
Figure 5: transposition de l'exploitation d'une équation bilan par un enseignant de 3 ^{ième}	68
Figure 1: réponse d'un apprenant de Tle à la quatrième question	95
Figure 2: détermination de la quantité de matière de dioxygène nécessaire à la réaction avec 2 mol de fer par un apprenant de la classe de 3 ^{ième}	97
Figure 3: détermination de la quantité de matière de dioxygène nécessaire à la réaction avec 2 mol de fer à partir de la règle de 3 par un élève de 3 ^{ième}	98
Figure 4: essai de détermination de la quantité de matière de dioxygène nécessaire pour la réaction complète avec 2 mol de fer par un apprenant de 3 ^{ième}	98
Figure 5: Réponse d'un apprenant de 1 ^{ière} à la sixième question.....	100
Figure 6: réponse d'un apprenant de Tle à la sixième question.....	100
Figure 7: réponse d'un apprenant de la classe de Tle à la sixième	101
Figure 8: détermination de la quantité de matière d'oxyde de fer (II) par un élève de 3 ^{ième} ..	107
Figure 9: Réponse d'un apprenant de la classe de 3 ^{ième} à la neuvième question.....	108
Figure 10: détermination de la quantité de matière d'oxyde fer (III) par un élève.....	109
Figure 11 : réponse d'un apprenant de la classe de 3 ^{ième} à la douzième question	117
Figure 12: réponse d'un apprenant de la classe de 3 ^{ième} à la douzième question.....	117
Figure 15: proposition de réponse d'un élève à la treizième question.....	120

RESUME

La stœchiométrie est un concept fondamental dans l'étude quantitative des systèmes chimiques et nécessite, en première instance une circulation entre les registres macroscopiques et microscopiques. Cependant, il s'avère que de nombreux apprenants, des classes de 3^{ième} en Tle, et même à l'université, éprouvent des difficultés à résoudre des problèmes de stœchiométrie. Nous avons envisagé identifier les origines de ces difficultés. Pour y parvenir, trois pistes ont été explorées: la piste institutionnelle (analyse du manuel et du programme officiels de la classe de 3^{ième}), la piste épistémologique (analyse de l'évolution des idées sur la stœchiométrie) et la piste conceptuelle (analyse des théories des niveaux de savoir). Les difficultés des élèves ont été décrites à la lumière de la théorie des niveaux de signification. Nous avons administré un questionnaire papier-crayon à un total de 239 apprenants des classes de 3^{ième} en Tle en poursuivant le double objectif de déterminer les significations qu'ils prêtent au réseau conceptuel de la stœchiométrie et d'analyser l'évolution de ces significations. Les résultats dévoilent que certains concepts dudit réseau conceptuel, à l'instar du coefficient stœchiométrique, sont au carrefour des trois niveaux de signification. Les autres sont, pour la plupart, fortement construits au niveau symbolique ; quelques allusions au niveau macroscopique se font ressentir et les significations au niveau microscopique sont très rares. Aussi, la relation entre la quantité de matière d'un composé, sa masse et sa masse molaire, qui reste mobilisée chez les apprenants de la classe de 3^{ième} au niveau symbolique, est la première convoquée lorsque ceux-ci doivent calculer la quantité de matière d'un composé engagé dans une réaction connaissant celle d'un autre en dépit de la relation mole à mole entre lesdits composés. Tout ceci nous permet de conclure que les apprenants de 3^{ième} de l'enseignement secondaire général prêtent des significations variées, et généralement non pertinentes au réseau conceptuel de la stœchiométrie. Ces significations non pertinentes et majoritairement au niveau symbolique, semblent beaucoup plus évoluer vers le niveau macroscopique que vers le microscopiques à mesure que les apprenants avancent dans leurs cursus. En outre, certaines conceptions erronées telles que l'assimilation du coefficient stœchiométrique à la quantité de matière initiale de réactif ou de produit formé semble aller grandissante à mesure que le niveau des élèves s'élève.

Mots clés : Equation bilan, stœchiométrie, niveaux de savoir, difficultés d'apprentissage, conceptions.

ABSTRACT

Stoichiometry is a fundamental concept to the quantitative study of chemical systems and requires, in the first instance, a flow between the macroscopic and microscopic registers. However, it turns out that many learners, from classes « 3^{ième} » to « Tle », and even at university, have difficulty solving stoichiometry problems. We wanted to identify the causes of these difficulties. To achieve this, we explored three different avenues: the institutional avenue (analysis of the official textbook and syllabus of the « 3^{ième} » class), the epistemological avenue (analysis of the evolution of ideas about stoichiometry) and the conceptual avenue (analysis of theories of levels of knowledge). The students' difficulties were described in the light of the theory of levels of meaning. We administered a paper-and-pencil questionnaire to a total of 239 learners in classes from « 3^{ième} » to Tle, with the dual aim of determining the meanings they attributed to the various concepts in the conceptual network of stoichiometry and analysing the evolution of these meanings. The results show that some concepts in the conceptual network of stoichiometry, such as the stoichiometric coefficient, are at the crossroads of the three levels of meaning. The others are, for the most part, strongly constructed at the symbolic level, with a few allusions to the macroscopic level and very few meanings at the microscopic level. Also, the relationship between a compound's quantity of matter, its mass and its molar mass, which is still mobilised at a symbolic level by class « 3^{ième} » learners, is the first to be called upon when they have to calculate the quantity of matter of a compound involved in a reaction knowing that of another, despite the mole-to-mole relationship between the said compounds. All this leads us to conclude that learners of « 3^{ième} » of the general secondary education attribute varied and generally irrelevant meanings to the concepts in the conceptual network of stoichiometry. These irrelevant meanings, mostly at the symbolic level, seem to evolve much more towards the macroscopic than the microscopic levels as the learners progress through their course. In addition, certain misconceptions, such as equating the stoichiometric coefficient with the quantity of initial reactant or product formed, seem to increase as the level of students rises.

Key words: Balance equation, stoichiometry, levels of knowledge, learning difficulties, conceptions.

Introduction générale

Pour expliquer la réaction chimique, il faut avoir une parfaite connaissance de la structure des réactifs et des produits. Cette réaction chimique se définit comme « *le mode de transformation de la matière par lequel les liaisons entre les atomes des réactifs se réarrangent, se redistribuent, pour donner des liaisons nouvelles dans les produits* » (Barlet & Plouin, 1994, p. 27). On passe ainsi d'espèces chimiques bien identifiées à d'autres espèces dites nouvelles, de natures et d'organisations différentes, souvent décrites pour la première fois s'il s'agit de composés nouveaux. Ce faisant, la réaction chimique débouche sur de multiples interrogations dues à sa complexité et à sa diversité par exemple : quel est le moteur des réactions chimiques ? Pourquoi deux réactions en sens inverse peuvent-elles simultanément se produire pour conduire à un état d'équilibre défini par la stationnarité macroscopique ? Quelles sont les exigences cinétiques d'une réaction chimique ? On comprend que la réaction chimique constitue un monde tellement diversifié et tellement complexe qu'il ne peut être question de l'aborder dans son ensemble. Nous aborderons, dans notre étude, un concept très fondamental : **l'équation-bilan**. Il s'agit d'un concept intégrateur introduit, au niveau macroscopique, sous la dénomination « d'équation littérale » en classe de 4^{ième} dans l'enseignement secondaire général Camerounais, elle est abordée au niveau microscopique en classe de 3^{ième} pour servir, à partir du second cycle, d'outil privilégié pour tout travail quantitatif en chimie (Barlet & Plouin, 1994). Or travail quantitatif en chimie rime avec un autre concept intégré par celui d'équation bilan : le concept de **stœchiométrie**. Conscients des difficultés que rencontrent les apprenants des classes de 3^{ième} en Tle (élèves de 13-19 ans) pour résoudre des problèmes de chimie quantitative, nous nous limiterons, dans ce travail, au concept de **stœchiométrie**.

Bon nombre d'auteurs se sont appesantis sur la question de la stœchiométrie en situation de la classe (Barlet & Plouin, 1994; BouJaoude & Barakat, 2003; Bridges, 2015; Ducamp & Rabier, 2005; Dumon & Laugier, 2004; Frazer & Servant, 1986; Gauchon, 2008; Gauchon & Méheut, 2007; Glažar & Devetak, 2002; Laugier & Dumon, 2004; Laugier & Dumon, 2000; Laugier & Dumon, 2003). Ces travaux ont permis de construire les conceptions des élèves sur le concept de « stœchiométrie » et sur les concepts fondamentaux de la chimie pouvant favoriser sa construction. Bon nombre de ces travaux se situent sur le plan de l'usage du concept de stœchiométrie par les apprenants que sur le plan de sa construction. En effet, les didacticiens s'attachent principalement à repérer les obstacles à l'apprentissage des concepts scientifiques et à proposer des moyens de remédiation. Ce faisant, ils s'intéressent davantage à la

construction des concepts élémentaires à des niveaux d'études inférieurs où ces concepts sont introduits dans l'enseignement avec l'idée qu'une bonne maîtrise de ces concepts élémentaires faciliterait la construction de concepts intégrateurs plus complexes.

Dans le même ordre d'idées, notre étude tente d'apporter un éclairage supplémentaire sur les difficultés des apprenants de 3^{ième} en Tle (élèves de 13-19 ans) à résoudre des problèmes de stœchiométrie. Notre démarche intègre les conceptions des apprenants de 3^{ième} en Tle sur le concept de stœchiométrie. Cette démarche se fonde sur une approche théorique des significations que les apprenants prêtent aux différents concepts du réseau conceptuel de la stœchiométrie.

Le présent travail se structure autour de quatre chapitres organisés en deux parties dont la présentation des objectifs et des contenus est la suivante :

Une première partie dénommée Cadre théorique constitué de deux chapitre. Le premier chapitre, intitulé « problématique de l'étude » situe le sujet dans son contexte institutionnel, puis dans son contexte scientifique. Une brève revue des recherches y antérieures est également présentée en vue de dégager la problématique. La question générale de recherche, les questions spécifiques, l'hypothèse générale et les hypothèses spécifiques ainsi que l'objectif général et les objectifs spécifiques sont enfin présentés.

Le deuxième chapitre dénommé « insertion théorique de l'étude quatre principales articulations. La première articulation est consacrée à un état des lieux sur les concepts clés de notre recherche à savoir conception et réseau conceptuel, la deuxième articulation présente les registres de représentation des savoirs en chimie. Il est question d'une part de la nature de la science chimique et d'autre part de quelques modèles des niveaux de savoir en chimie de Johnstone jusqu'à Dehon. La troisième articulation présente une brève lecture de l'évolution du savoir sur le concept de stœchiométrie du point de vue des niveaux de la théorie des niveaux de savoir. Il est question de présenter l'évolution des idées sur la stœchiométrie afin de déceler les ruptures historiques, de prédire les potentielles difficultés des apprenants et surtout de repérer les concepts du réseau conceptuel de la stœchiométrie. La quatrième, dénommée : « étude de la transposition didactique du concept de stœchiométrie en classe de 3^{ième} de l'enseignement secondaire général Camerounais » permet de mettre en évidence les obstacles didactiques susceptibles d'émerger lors de la construction de la « notion de réaction chimique » dès la classe de 3^{ième} (élèves de 13-15 ans). Elle s'articule autour de trois sous parties : une première sous partie consacrée à une présentation de quelques points essentiels de la théorie de

la transposition didactique ayant gouverné nos analyses, une seconde sous partie où est effectuée une analyse de la transposition didactique de la « notion de réaction chimique » dans le programme puis dans le manuel officiel de la classe de 3^{ème} et enfin une troisième sous partie qui propose une analyse de la transposition didactique de la « notion de réaction chimique » par les enseignants de la classe de 3^{ème} de l'enseignement secondaire général Camerounais.

Le quatrième chapitre intitulé « méthodologie de l'étude » décrit le type de recherche menée ceci en présentant les échantillons que nous avons constitués pour l'identification des significations que les apprenants ayant reçu un enseignement sur la notion de réaction chimique prêtent aux concepts du réseau conceptuel de la stœchiométrie. Les techniques de collecte des données y sont également décrites.

Le cinquième chapitre intitulé présentation et analyse des résultats questionne les significations que les apprenants de 3^{ème} en Tle (élèves de 13-19 ans) prêtent aux différents concepts du réseau conceptuel de la stœchiométrie. Ce chapitre a trois grandes articulations : premièrement une présentation des résultats, ensuite une discussion sur ces résultats et enfin quelques suggestions. Précisons que ces deux derniers chapitres constituent la deuxième partie du présent travail intitulée cadre méthodologique et opératoire.

Partie 1 : Cadre théorique

CHAPITRE 1 : PROBLEMATIQUE DE L'ETUDE

1.1. Contexte et justification

Depuis plusieurs années, le Cameroun est animé par une dynamique d'émergence à l'horizon 2035 qui devrait se caractériser par une croissance sur le plan économique. Pour mener à bien cette quête, le gouvernement Camerounais a mis sur pied un ensemble de stratégies pour la croissance économique consignées dans un document appelé DSCE. Ce dernier *place au centre de ses actions le défi de croissance et de création des emplois* (DSCE, page 8). Le volet stratégie de croissance touche le développement humain et par ricochet l'éducation. Dans l'alinéa 256 du DSCE consacré à l'éducation et formation professionnelle, on peut lire :

Dans le cadre général du développement humain et afin de donner en particulier aux ressources humaines de la Nation les capacités nécessaires pour bâtir une économie camerounaise émergente à l'horizon 2035, le Gouvernement entend mettre un accent important sur la formation du capital humain, à travers la mise en œuvre avec détermination de la Stratégie Sectorielle de l'Education

Cet extrait montre la place indéniable de la formation des camerounais dans le processus d'émergence du pays. Or, comme mentionné dans l'article 4 de la loi d'orientation de l'éducation au Cameroun¹, *la formation de l'enfant en vue de son épanouissement intellectuel, physique, civique et moral et de son insertion harmonieuse dans la société, en prenant en compte les facteurs économiques, socio-culturels, politiques et moraux est la mission principale de l'éducation*. Par conséquent, l'éducation a un rôle majeur à jouer dans cette émergence du Cameroun.

L'article 11 de la même loi renchérit en ces termes :

L'Etat assure l'élaboration et la mise en œuvre de la politique de l'éducation à laquelle concourent les collectivités territoriales décentralisées, les familles ainsi que les institutions publiques et privées. A cette fin, il :

- *arrête les objectifs et les orientations générales des programmes nationaux d'enseignement et de formation, en liaison avec tous les secteurs de la vie nationale en vue de la professionnalisation de l'enseignement;*

¹ L'éducation au Cameroun est régie par la loi N°98/004 du 14 Avril 1998 qui en fixe le cadre juridique général (article premier).

- *veille à l'adaptation permanente du système éducatif aux réalités économiques et socio-culturelles nationales ainsi qu'à l'environnement international, particulièrement en ce qui concerne la promotion des enseignements scientifiques et technologiques, du bilinguisme et l'enseignement des langues nationales;*

Cet article montre la flexibilité des programmes d'enseignement ainsi que leur liaison directe avec la vision socioéconomique du pays.

Le Cameroun, dans la poursuite de son projet de « société des grandes ambitions », a désormais besoin de têtes « bien faites » plutôt que de têtes « bien pleines ». Il ressent la nécessité de passer d'une approche éducative basée sur la simple transmission des connaissances à une approche basée sur l'acquisition des compétences. C'est ce qui explique l'adoption, depuis l'année scolaire 2013/2014, de l'Approche Par les Compétences (APC) avec entrée par les situations de vie ; un paradigme qui ambitionne sortir les élèves de la récitation de savoirs décontextualisés pour les amener à la construction de savoirs au regard des situations qu'ils rencontrent au quotidien et par là-même développer des compétences leur permettant de s'insérer facilement dans la société.

Ce mouvement de réforme curriculaire a affecté toutes les disciplines enseignées du primaire au secondaire et les disciplines scientifiques en particulier, à savoir la chimie. C'est ainsi que l'arrêté N°419/14/MINESEC/IGE du 9 décembre 2014 portant sur définition des programmes de 4^{ème} et 3^{ème} a été signé, visant à permettre à l'apprenant de développer des compétences lui permettant :

- *de communiquer à l'écrit et à l'oral sur des phénomènes scientifiques de son environnement ;*
- *de comprendre et d'expliquer des phénomènes naturels ;*
- *de résoudre les problèmes que ces derniers posent dans les domaines de vie ;*
- *de sauvegarder et gérer durablement son environnement ;*
- *de mettre en œuvre des processus d'acquisition des connaissances ;*
- *d'implémenter la démarche scientifique et la démarche technologique ;*
- *de comprendre et exploiter son environnement*

L'un des thèmes centraux abordés dans ce sous cycle est la « réaction chimique ». Celui-ci vise à donner les aptitudes suivantes à l'élève :

- Schématiser une réaction chimique par une équation -bilan;
- Identifier dans une équation-bilan, les produits et les réactifs ;
- Écrire et équilibrer une équation-bilan d'une réaction chimique ;
- Exploiter une équation-bilan d'une réaction chimique;
- Montrer la conservation de la matière au cours d'une réaction chimique

Ces derniers englobent tous les savoir-faire du domaine de la chimie développés dans les classes inférieures et sont des outils pour aborder les contenus des classes du second cycle. Par-là, la fin du premier cycle et de la classe de 3^{ième} en particulier marque la fin du cycle d'initiation à la chimie débuté en classe de 6^{ième}. **A partir de la classe de seconde, les concepts du réseau conceptuel de la stœchiométrie, supposés construits en classe de 3^{ième}, sont des outils permettant l'étude quantitative de diverses réactions chimiques.**

Pourtant, les difficultés rencontrées par les élèves du second cycle témoignent d'une mauvaise construction de bon nombre de concepts abordés au premier cycle. Le concept de réaction chimique est le premier pointé du doigt. De nombreuses recherches en didactique de chimie sont consacrées à la réaction chimique : la nécessité de construire le concept de substance au début de l'introduction dudit concept à l'école (Solomonidou & Stavridou, 1994) les obstacles épistémologiques à la construction du concept de réaction chimique (Carreto & Viovy, 1994) les stratégies utilisées par les élèves pour résoudre des problèmes de stœchiométrie (Glažar & Devetak, 2002), la part de responsabilité de la symbolique chimique dans les difficultés rencontrées par les élèves (Barlet & Plouin, 1994; Dehon, 2018; Dumon & Laugier, 2004).

Parlant de l'équation bilan de réaction, représentation de la réaction chimique elle-même concept scientifique rendant compte de la transformation chimique, (Barlet & Plouin, 1994) la dénomment « concept intégrateur » et avancent que sa construction doit se faire de façon échelonnée en commençant par les concepts de niveau inférieur à savoir la symbolique ; l'identité des composés chimiques ; le passage du macroscopique au microscopique : la mole ; la loi d'Avogadro-Ampère ; la stœchiométrie. Ce dernier concept est considéré par (Paideya & Sookrajh, 2010) comme « *le fondement de la chimie, donc si les élèves ne comprennent pas la stœchiométrie, ils ne comprendront pas la chimie* »². En outre, la plupart des problèmes mathématiques de chimie tournent autour de la stœchiométrie. C'est fort de tout cela que nous jetons notre dévolu, dans le cadre du présent travail, sur la stœchiométrie.

² Stoichiometry is the foundation of chemistry, so if students cannot understand stoichiometry, they cannot understand chemistry. (Traduction libre de (Bridges, 2015)).

1.2. Pertinence scientifique

La stœchiométrie est un concept chimique mathématique qui permet de déterminer quelle est la quantité de produit qui sera produite à partir d'une quantité précise de réactifs. (Zumdahl, 2002). Déterminer la quantité de produit qui se formera à partir d'une quantité de matière de réactif donnée constitue la tâche régulièrement assignée aux élèves dans des exercices de chimie. C'est de l'échec des élèves à cette tâche que sont parties bon nombre de recherches en didactique relatives à la stœchiométrie en général. Certaines sont centrées sur les conceptions des apprenants sur les coefficients stœchiométriques (Barlet & Plouin, 1994), d'autres évoquent les conceptions des élèves sur le réactif limitant (Gauchon, 2008; Gauchon & Méheut, 2007), d'autres encore sont dédiées aux différentes stratégies utilisées par les élèves lors de la résolution des problèmes de stœchiométrie (Glažar & Devetak, 2002; Shadreck & Enunuwe, 2018). Conscients des difficultés que pose la stœchiométrie, certains chercheurs ont proposé un ensemble de situations problèmes (expérimentales) pour permettre aux élèves de conceptualiser la stœchiométrie. Les résultats obtenus n'ont pas été assez satisfaisants puisque les élèves n'arrivent pas à utiliser la quantité de matière comme grandeur de décompte des particules (atomes, ions, molécules) dans un système. Le concept de stœchiométrie étant mathématique, les enseignants ont développé un nombre important de méthodes permettant aux élèves de résoudre algorithmiquement les problèmes qui l'évoquent. Seulement, comme l'ont montré (Ducamp & Rabier, 2005; Nakhleh & Mitchell, 1993; Nurrenbern & Pickering, 1987; Stamovlasis et al., 2005), le fait de proposer un algorithme de résolution et de montrer la quantité de problèmes qu'il faut résoudre ne facilite pas la compréhension des concepts sous-jacents ; l'enseignement d'algorithmes ne mène pas nécessairement à un apprentissage de concepts. Ce qui confirme les observations de Laugier et Dumon (2004) : « *La majorité des élèves pense savoir effectuer l'opération « d'équilibrage » d'une équation chimique, il s'agit d'une opération qui relève d'une arithmétique comptable, mais cette compétence ne signifie pas pour autant qu'ils aient bien compris ce que représentait cette équation* ». Cette richesse de la littérature témoigne à suffisance des problèmes que peut poser la stœchiométrie dans l'enseignement de la chimie et de la nécessité de mener des études sur la question.

Nous connaissons quelles sont les conceptions des élèves Belges, Marocains, Grecs, Canadiens, Français, ...sur concept de stœchiométrie, mais nous ne savons rien de celles des élèves Camerounais. Certes, sur le plan cognitif, les difficultés rencontrées par les apprenants d'une région ne sont pas très différentes de celles rencontrées par les apprenants d'une autre région, mais, les Camerounais ne sont pas soumis aux mêmes programmes que les Belges, les

Canadiens, les Grecs, donc il importe d'étudier minutieusement leur cas. Par ailleurs, très peu de recherches en didactique explorent la piste institutionnelle, en analysant les curricula et manuels aux programmes pour tenter d'expliquer les difficultés rencontrées par les élèves dans la construction d'un concept. Notre recherche ambitionne combler ce vide dans la littérature.

1.3. Pertinence pédagogique

Examiner les conceptions des élèves sur la stœchiométrie donnera à l'enseignant de chimie des points de départ pour un cours portant sur la réaction chimique. En effet, l'APC s'adosse sur un cadre socioconstructiviste qui veut que les leçons débutent par des situations problèmes porteuses d'obstacles. Ces obstacles se voient grâce aux conceptions erronées des apprenants. De plus, une analyse des programmes et manuels au programme permettra de les améliorer et par là-même donner aux enseignants des outils de qualité sur lesquels s'appuyer pour préparer leurs leçons.

1.4. Position et formulation du problème

1.4.1. Les constats

En tant qu'enseignante de chimie, nous avons côtoyé les élèves de divers niveaux de la troisième en 1^{ière}/ 2^{ème} année université en passant par les Classes Scientifiques Spéciales de l'Ecole Normale Supérieure de Yaoundé. En leur donnant des enseignements sur les multiples notions de chimie selon leurs programmes et classes respectives, nous avons fait plusieurs observations qui nous ont conduits à entreprendre cette recherche.

Premièrement, les élèves de première, terminale et étudiants, débutent rarement la résolution d'exercices de chimie par l'écriture de l'équation de réaction. A moins que ce ne soit un problème de chimie physique (niveaux d'énergie) ou un exercice de chimie organique dédié à l'identification des familles de composés, les exercices de chimie traitent généralement des réactions chimiques à partir de la classe de 1^{ière} pourtant les élèves s'y adonnent sans au préalable penser à écrire l'équation qui la traduit. Ils semblent être incapables, non seulement d'identifier une transformation chimique, mais aussi de faire recours à une équation bilan pour la matérialiser. En clair, ils éprouvent des difficultés à circuler entre le registre macroscopique et le registre microscopique ce qui se traduit par la difficulté à établir la connexion entre la transformation chimique et la réaction chimique. A ce sujet, Stamovlasis et al (2005) affirme

que : «un nombre important d'élèves n'identifie pas toujours une transformation chimique à la réaction »³. (Stamovlasis et al., 2005).

Par ailleurs, les élèves, même en classe de terminale ne conçoivent pas qu'une réaction chimique peut être unique quelles que soient les quantités de matières initiales de réactif. Cette difficulté, Laugier et Dumon l'attribuent au « *statut ambiguë de l'équation bilan* » (Dumon & Laugier, 2004)

De plus, les enseignants de chimie Camerounais fondent généralement leur enseignement sur les exercices. Tout se passe comme si leur objectif était de rendre les élèves capables de résoudre les problèmes plutôt que les amener à construire le concept sous-jacent.

Nous avons également fait des constats empiriques. En terminale, pour calculer le nombre d'oxydation d'un élément dans un composé impliqué dans une réaction chimique dont l'équation est donnée, des élèves font intervenir le coefficient stœchiométrique. Il semblerait qu'une confusion est faite entre le coefficient stœchiométrique et l'indice ou alors le coefficient stœchiométrique est identifié à l'indice (Dehon & Snauwaert, 2015). En outre, les élèves utilisent parfois les données en masse de l'énoncé pour équilibrer les équations bilans de réactions. Par exemple, dans un énoncé, on dit : la combustion de d'un hydrocarbure aboutit à 5g de dioxyde de carbone et 3,3g d'eau. Ecrire l'équation de la réaction. Un élève, à la hâte, inscrit 5 devant CO_2 et 3,3 devant H_2O . Ceci montre la difficulté qu'ont les élèves de première scientifique à partir des données d'une expérience pour écrire et équilibrer une équation bilan de réaction d'une part. D'autre part, cela laisse voir que les coefficients stœchiométriques semblent construits chez ces élèves au niveau macroscopique.

1.4.2. Problème

A partir de la classe de 3^{ième}, les apprenants de l'enseignement secondaire Camerounais doivent être capables de passer de la description macroscopique de la transformation chimique à sa description microscopique. Pour Dumon et Laugier, « *C'est l'équation de réaction qui permet ce passage de l'observation expérimentale à la modélisation grâce au recours à l'échelle atomique et moléculaire* » (Laugier & Dumon, 2004). Cette équation de réaction, Barlet et Plouin la qualifient de « concept intégrateur », puisqu'elle

Permet de rendre compte de l'observation expérimentale à l'échelle d'une très grande population d'entités chimiques mais qu'elle ne prend sens que grâce au

³ A number of students do not always identify chemical phenomena with reaction(s). (Traduction libre de Stamovlasis, 2003)

recourt à l'échelle atomique et moléculaire. Ce passage de l'observable au modélisable nécessite la maîtrise de concepts du registre microscopique (atome, élément, molécule, ion, masses atomique et moléculaire), du registre macroscopique (espèce chimique, corps simple, corps composé, masse molaire), du registre symbolique (symboles des éléments, formules des espèces chimiques, nombres stœchiométriques) et enfin de l'opérateur qui permet de « faire le transfert de l'individu chimique non observable à une collection d'individus chimiques observable ». (Dumon & Laugier, 2004,p.1132)

La construction du concept d'équation bilan, au centre de la séquence⁴ portant sur « la notion de réaction chimique » en classe de troisième et indispensable à l'interprétation des cas particuliers de réactions étudiées au second cycle, nécessite donc une grande capacité d'abstraction. Nous étudierons en particulier, les conceptions alternatives des élèves de troisième en terminale sur la stœchiométrie.

Les savoirs à développer dans la séquence portant sur « la notion de réaction chimique » en classe de troisième sont les suivants : « Définitions : réaction chimique, réactif, produit, équation-bilan; Loi de conservation de la matière au cours d'une réaction chimique ; Réaction entre le fer et le soufre ». A première vue, le concept de stœchiométrie n'apparaît nulle part. Au terme de cette séquence d'enseignement, les savoir-faire attendus de l'apprenant sont les suivants: « *schématiser une réaction chimique par une équation bilan, identifier dans une équation bilan les produits et les réactifs, écrire l'équation-bilan de la réaction entre le fer et le soufre et celles de quelques réactions de combustion vues en classe de 4^{ième} ; écrire et équilibrer une équation-bilan d'une réaction chimique ; exploiter une équation-bilan d'une réaction chimique ; montrer la conservation de la matière au cours d'une réaction chimique* ». Une remarque est frappante : l'emphase est mise sur le concept d'équation bilan. Ce dernier est pourtant un concept intégrateur et nécessite pour sa bonne conceptualisation, la construction de concepts sous-jacents à l'instar de la stœchiométrie. Elle intervient pourtant fortement dans l'« équilibrage » d'une équation bilan, et, couplée au concept de mole, elle devient l'outil incontournable pour effectuer les bilans de quantités de matière au cours d'une réaction chimique (ce que les concepteurs de programmes ont appelé "exploiter une équation bilan"). Il y a là un problème de statut de la stœchiométrie puisqu'elle ne semble pas être un concept à part entière, mais évoluer sous l'ombre de l'équation bilan.

⁴ Dans le paradigme APC, le terme séquence renvoie à leçon.

Bien plus, dans le manuel au programme de la classe de 3^{ème}, le processus « d'écriture » des équations bilans de réactions est explicité en ces termes : « *pour établir une équation bilan, - on écrit les réactifs à gauche et les produits à droite ; - on équilibre l'équation bilan en plaçant devant la formule des réactifs et des produits des (nombres) appelés coefficients stœchiométriques afin de respecter le principe de conservation des éléments* » (physique chimie technologie 3^{ème} collection DEWATEK, page 26-27). En guise de résumé, on lit : « *Equilibrer une équation bilan de réaction consiste à placer devant la formule des réactifs et des produits des coefficients stœchiométriques afin d'assurer la conservation des nombres d'atomes de chaque espèce au 1er membre et au 2^{ème} membre de chaque équation* » (physique chimie technologie 3^{ème} collection DEWATEK, page 27). Que représentent les coefficients stœchiométriques ? A quoi servent-ils ? Leur seule mission est-elle d'assurer la conservation des éléments ? Quels rapports ont-ils directement avec le déroulement de la réaction chimique ? Pourquoi équilibrer une équation de réaction ? Telles sont les questions que l'on peut se poser à la lecture de cette portion du livre au programme. Dans le même ouvrage, nous pouvons lire, au sujet de l'exploitation d'une équation bilan de réaction que : « *Au cours d'une réaction chimique, les quantités de produits formés et de réactifs consommés sont proportionnelles aux coefficients de l'équation* » (physique chimie technologie 3^{ème} collection DEWATEK, page 27-28). Cette phrase, qui semblait certainement simple pour les auteurs du livre, soulève plusieurs questions. Pourquoi des « nombres » qui plus haut assuraient la conservation des éléments au cours d'une réaction chimique semble désormais dicter le déroulement de ladite réaction ? Il se crée un problème de statut du coefficient stœchiométrique.

1.5. Les questions de recherche

Nous pensons que les difficultés à résoudre les problèmes de stœchiométrie, rencontrées par les élèves, sont liées à leur mode de pensée des différents concepts du réseau conceptuel de la stœchiométrie. De ce fait, notre question principale s'énonce ainsi : **quelles sont les conceptions des apprenants des classes de 3^{ème} en Tle de l'enseignement secondaire Camerounais sur le concept de stœchiométrie ?**

Pour mieux aborder cette question principale de recherche, il est important de souligner certaines considérations.

D'abord, le processus scolaire a son enchaînement, sa logique son organisation complexe. Il se déroule sous forme de leçons ou de travaux pratiques. Aujourd'hui, certaines leçons sont abordées en classe, demain ce sont d'autres. Le processus scolaire est réglé par un programme,

une progression et un emploi de temps. Selon Vygotsky (1997), ce serait une grande erreur de supposer que ces lois externes de la structure du processus scolaire coïncident parfaitement avec les lois internes du processus du développement que déclenche l'apprentissage. Par ailleurs, Chevallard note que les enseignants accordent une confiance quasi aveugle à la possibilité de traiter efficacement une difficulté répétée par la seule réorganisation du texte de savoir⁵. C'est au contraire l'ensemble solidaire des caractéristiques d'une situation d'enseignement qui peut produire des effets, et non le seul texte de savoir. De ce fait, « *pour garder sa pertinence, le jugement d'une transposition doit s'étendre à sa mise en pratique autrement dit, à sa poursuite en situation de classe* » (Johsua & Dupin, 1993, p. 202). Tout ceci nous amène à examiner la pertinence de la présentation du concept de réaction chimique en particulier dans le programme, le manuel et les notes de cours des enseignants de la classe de 3^{ème}. Notre première question spécifique est donc formulée comme suit :

La transposition didactique du concept de stœchiométrie dans l'enseignement secondaire général Camerounais permet-elle aux apprenants, à partir de la classe de 3^{ème} de construire des significations pertinentes du réseau conceptuel de la stœchiométrie?

Il sera question, dans cette partie, d'identifier les différents concepts qui organisent la construction du concept de stœchiométrie dans le programme, les manuels scolaires et les notes de cours de quelques enseignants de la classe de 3^{ème} (élèves de 13-15ans) puis de caractériser le type d'enseignement pouvant se développer sur la base de ces manuels et par ricochet prédire les significations que les apprenants pourraient construire à la suite d'un tel enseignement.

Ensuite, Dehon & Snauwaert (2015) émettent l'idée selon laquelle l'établissement de liens forts entre les significations aux niveaux macroscopique et microscopique et les signes contenus dans une équation bilan de réaction constitue une démarche favorable à une compréhension en profondeur des concepts de base de la chimie. Cette idée nous amène à nous poser la question de savoir :

Dans quels niveaux se trouvent les significations que les apprenants des classes de 3^{ème} en Tle de l'enseignement secondaire général Camerounais prêtent au réseau conceptuel de la stœchiométrie?

⁵ Cette notion est davantage explicitée au chapitre 3

Il s'agira dans cette deuxième partie d'identifier les significations que les apprenants de 3^{ième} et du second cycle prêtent au réseau conceptuel de la stœchiométrie tout en les rangeant dans les différents niveaux de signification.

1.6. Les hypothèses de recherche

Nous formulons les hypothèses suivantes :

- **Hypothèse générale** : Les apprenants des classes de 3^{ième} en Tle de l'enseignement secondaire général Camerounais ayant reçu un enseignement sur le concept de réaction chimique ont des conceptions variées et généralement non pertinentes de la notion de stœchiométrie.
- **Hypothèse spécifique 1** : La transposition didactique du concept de stœchiométrie dans l'enseignement secondaire général Camerounais est peu adaptée à la construction de significations pertinentes du réseau conceptuel de la stœchiométrie par les élèves à partir de la classe de 3^{ième}.
- **Hypothèse spécifique 2** : Les différents concepts du réseau conceptuel de la stœchiométrie sont liés à de nombreuses significations elles-mêmes associés à un ou plusieurs niveaux.

1.7. Objectifs de recherche

1.7.1. Objectif général

L'objectif général poursuivi par le présent travail est celui de déterminer les conceptions des apprenants des classes de 3^{ième} en Tle de l'enseignement secondaire général Camerounais sur le réseau conceptuel de la stœchiométrie.

1.7.2. Objectifs spécifiques

L'objectif général peut se décliner en deux objectifs spécifiques à savoir :

- **Objectif spécifique 1** : Analyser la transposition didactique du concept de stœchiométrie dans les manuel, programme et notes de cours des enseignants de la classe de 3^{ième} de l'enseignement secondaire général Camerounais afin de prédire les significations construites par les apprenants.
- **Objectif spécifique 2** : Déterminer les significations que les apprenants des classes de 3^{ième} en Tle de l'enseignement secondaire général Camerounais prêtent au réseau conceptuel de la stœchiométrie ainsi que les niveaux auxquels ils se réfèrent. Par la même occasion, étudier l'évolution de ces significations avec le niveau des élèves

1.8. Délimitation géographique de l'étude

Les données analysées dans le présent travail ont été recueillies dans trois établissements de la ville de Yaoundé : lycée général Leclerc, le Lycée de Ngoaekelle, lycée de BIyem-assi et trois établissements de la ville de Bafoussam : Lycée Bilingue de Bafoussam, lycée technique de Bafoussam⁶ et le collège « colibris ».

⁶ Au Cameroun, les classes de 2^{nde}, 1^{ière} et Tle de série E, dont les programmes de chimie entre autre sont fixés par le ministère de l'enseignement secondaire général sont retrouvés dans les lycées techniques.

Chapitre 2 : Insertion théorique de l'étude

2.1. Etat des lieux sur les conceptions

2.1.1. Emergence et définition du concept

La thématique des représentations ou conceptions occupe une place importante en didactique (Astolfi & Develay, 1989; Johsua & Dupin, 1993; Viennot, 1996). De nombreux auteurs (Astolfi & Develay, 1989; Giordan & De Vecchi, 1987) utilisent l'un et l'autre terme sans distinction. La distinction semble surtout historique. Lorsque les didacticiens ont commencé à s'intéresser aux représentations des élèves, le concept de représentation a été importé de la psychologie sociale (Durkheim, 1912) et de la psychologie génétique (Bruner, 1966; Piaget, 1975).

En didactique cependant, la représentation désigne le « *déjà-là conceptuel* » (Astolfi & Develay, 1989). Les travaux se sont ensuite multipliés et certaines études (Viennot, 1979) ont montré l'écart considérable entre les idées des apprenants et le savoir savant. Ces travaux montrent aussi l'extrême solidité de ces idées et leur persistance malgré l'enseignement reçu. Parceque la représentation a peu à peu été considérée comme une structure cognitive complexe et comme le processus d'une activité de reconstruction mentale (Robardet & Guillaud, 1997), le terme de conception a alors paru plus approprié.

Les conceptions se caractérisent par leur résistance à l'enseignement et par leur évolution à long terme. Elles sont indépendantes des questions posées et seules certaines situations permettent leur émergence. Dans notre étude, nous sommes vigilants à l'émergence de conceptions telles que nous les avons caractérisées au paragraphe précédent mais nous utilisons aussi le concept de représentation, au sens premier donné par la psychologie sociale. Nous l'explicitons maintenant. Comme le définit le psychosociologue (Moscovici, 1989), le sujet a besoin de se représenter (rendre présent à l'esprit) un phénomène, une nouvelle théorie scientifique par exemple, pour se l'approprier. Le sujet peut être un individu ou un groupe social et l'objet « *peut être aussi bien une personne, une chose, un événement matériel, psychique ou social, un phénomène naturel, une idée, une théorie, etc. ; il peut être aussi bien réel qu'imaginaire ou mythique, mais il est toujours requis* » (Jodelet, 2003). Et les représentations permettent aux individus de maîtriser leur environnement ou d'agir sur celui-ci. En ce sens, nous retenons une définition de Abric (1997) : « *[la représentation] comme une vision fonctionnelle du monde, qui permet à l'individu ou au groupe de donner du sens à ses conduites, et de comprendre la réalité, à travers son propre système de références, donc de s'y adapter, de s'y définir une place.* » (Abric, 1997)

Dans notre travail, nous mettons les élèves face à diverses activités. Répondre aux questions posées nécessite quelques fois qu'ils se représentent le phénomène ou le processus. Cette représentation repose sur des références préexistantes : connaissances antérieures, conceptions, connaissances en cours d'acquisition. Caractériser les représentations des phénomènes ou processus, développées par les élèves, nous semble essentiel car les représentations permettent de déterminer où en est l'acquisition du savoir visé. La détermination de la représentation d'un phénomène ou d'un concept par un groupe social (les élèves) se fait par l'exploration des explications données par les élèves et de leurs erreurs lors de la réalisation de diverses tâches (réalisation d'exercices écrits, réalisation d'expériences). Ce qui permet au chercheur en didactique de mesurer l'écart entre le savoir de référence et les idées des apprenants, de repérer la représentation par les élèves de la connaissance visée. C'est à partir de l'étude des représentations des élèves que le chercheur peut faire des inférences sur leurs conceptions. On ne peut pas observer directement ces processus, seules leurs manifestations sont observables. Il s'agit donc de faire l'hypothèse que « *l'élève fonctionne comme cela...* » (Robardet & Guillaud, 1997). Tout ceci nous rapproche du point de vue de Giordan et De Vecchi (1987) sur les conceptions.

2.1.2. Les conceptions au sens de Giordan et De Vecchi (1987)

Sous le terme générique de conceptions, les auteurs regroupent les questions, les idées, les façons de raisonner, le cadre de références des élèves lorsqu'ils se retrouvent en situation d'apprentissage. Avant d'aborder un enseignement, les élèves ont déjà des idées (directement ou indirectement) sur les savoirs enseignés et c'est à travers elles qu'ils essaient de comprendre les propos de l'enseignant ou qu'ils interprètent les situations proposées ou les documents fournis. Ces "conceptions" ont une certaine stabilité ; l'apprentissage d'une connaissance, l'acquisition d'une démarche de pensée en dépendent complètement. Si l'on n'en tient pas compte, ces conceptions se maintiennent et le savoir proposé n'est pas construit par les élèves.

Plusieurs didacticiens s'entendent sur le fait que la connaissance de ces idées, de ces façons de raisonner permet à l'enseignant d'adapter l'enseignement ou du moins de proposer une pédagogie beaucoup plus efficace. Seulement, s'appuyer sur les conceptions des apprenants ne veut pas dire "y rester". L'acquisition d'un savoir est à la fois l'apprentissage d'attitudes, de démarches et de quelques "grands" concepts (ou connaissances fondamentales). Y accéder n'est pas chose aisée. Il ne suffit pas de bien présenter une somme de connaissances à un élève (de lui en dire plus, de les lui montrer mieux), pour que ce dernier comprenne, mémorise et intègre spontanément. C'est l'apprenant qui, seul, peut élaborer chaque brique de savoir. Et il ne peut le

faire qu'en s'appuyant sur les seuls outils qui lui sont disponibles, c'est-à-dire ses conceptions. Par ailleurs, une conception, ce n'est pas ce qui émerge en classe, c'est-à-dire ce que l'élève dit, écrit ou fait. Une conception correspond à la structure de pensée sous-jacente qui est à l'origine de ce que l'élève pense, dit, écrit ou dessine.

Une conception n'est jamais gratuite, c'est le fruit de l'expérience antérieure de l'apprenant (qu'il soit enfant ou adulte). C'est à la fois sa grille de lecture, d'interprétation et de prévision de la réalité que l'individu a à traiter et sa prison intellectuelle. Il ne peut comprendre le monde qu'à travers elle. Elle renvoie à ses interrogations (ses questions). Elle prend appui sur ses raisonnements et ses interprétations (son mode opératoire), sur les autres idées qu'il manipule (son cadre de références), sur sa façon de s'exprimer (ses signifiants) et sur sa façon de produire du sens (son réseau sémantique). Ces divers éléments ne sont évidemment pas facilement dissociables, ils sont totalement en interaction comme l'indique la formule ci-après : « *conception=f(P.C.O.R.S)* » (Giordan & De Vecchi, 1987, p. 87).

Le problème (P) est considéré comme un ensemble de questions plus ou moins explicites qui induisent ou provoquent la mise en œuvre de la conception. Il est considéré comme point d'accrochage des conceptions puisque « *toute représentation ne semble exister que par rapport à un problème même si celui-ci est fréquemment implicite* » (Giordan & De Vecchi, 1987, p. 89). Les auteurs concluent donc que « *les conceptions ne sont pas de simples images ou représentations mentales, mais bien les indices d'un modèle, d'un mode de fonctionnement compréhensif, en réponse à un champ de problème* » (Giordan & De Vecchi, 1987, p. 89). Une conception s'élabore donc à partir de l'interaction entre 4 autres paramètres : le cadre de référence, les invariants opératoires, le réseau sémantique et le signifiant.

Le cadre de référence (C) représente un ensemble de connaissances périphériques activées par le sujet pour formuler sa conception. Plus précisément, il s'agit de 'ensemble des connaissances antérieurement intégrées qui, activées et intégrées donnent un contour à la conception. C'est ce contour qui d'ailleurs amène l'apprenant à se poser des questions. Il fournit le contexte (informations, autres conceptions) qui va rendre significatives la formation et la présentation du construct⁷. C'est lui en effet, qui avec les opérations mentales, régule la conception.

Les opérations mentales (O) désignent l'ensemble des opérations intellectuelles ou transformations que l'apprenant maîtrise et qui lui permettent de mettre en relation les éléments

⁷ Autre dénomination de la représentation, synonyme de Conception selon Giordan et De Vecchi (1996, p. 79)

du cadre de référence et ainsi de produire et d'utiliser la connaissance. Il s'agit d'invariants opératoires.

Le réseau sémantique (R) pour sa part est une organisation mise en place à partir du cadre de référence et des opérations mentales. Il transcende cependant ces deux structures, car constitue un réseau de significations dont les nœuds représentent le cadre de référence et dont les liaisons peuvent être assimilées aux opérations mentales. Il produit le sens de la relation.

Enfin, les signifiants (S) qui regroupent l'ensemble des signes, traces, symboles et autres formes du langage (naturel, mathématique, graphique, schématique, modélisé...) sont utilisés en vue de produire et expliquer les conceptions.

Tout au long de notre travail, nous emploierons le terme « conception » au sens de Giordan et De Vecchi (1987). Il est important pour la suite de s'intéresser aux différentes origines de ces conceptions.

2.1.3. Les origines des conceptions

Les didacticiens prêtent au moins cinq origines aux conceptions :

- ✓ Psychogénétique (Piaget) : les conceptions sont liées à l'inachèvement du développement de l'enfant. Des adhérences aux fonctions intellectuelles de l'enfant (anthropomorphisme, animisme, égocentrisme, artificialisme, réalisme) entravent la prise en compte de la réalité objective ;
- ✓ Epistémologique (Bachelard) : certains modes de pensées, tels les opinions et tout ce « *complexe d'intuitions premières* », génèrent des obstacles à l'apprentissage. De nombreux chercheurs pensent que bon nombre d'obstacles rencontrés par les élèves sont liés à la nature même du savoir ;
- ✓ Didactiques : les difficultés sont générées par les situations didactiques elles-mêmes, la manière dont les savoirs scolaires construisent une réalité propre à instituer des représentations qui ne sont pas remises en cause.
- ✓ Sociologiques (Moscovici) : dans ce cas précis, les conceptions des élèves proviennent des représentations sociale et des préjugés. Comme exemple nous avons la pensée commune sur la raison forcément exogène de la maladie empêche de penser les maladies génétiques. ;
- ✓ Psychanalytiques (Freud) : les conceptions relèvent du fantasmatique, des contenus psychiques, de l'affect et de l'histoire personnelle de l'individu.

Afin de mieux comprendre les conditions de mise en œuvre des conceptions, nous choisissons de les présenter du point de vue de Giordan et De Vecchi (1987).

2.2. La nature de la chimie

2.2.1. Le langage de la chimie : expliquer du visible par de l'invisible compliqué

Anciens ou modernes, les chimistes veulent voir avec les yeux du corps avant d'employer ceux de l'esprit. Ils veulent faire les théories pour les faits et non chercher des faits pour les théories préconçue (Dumas, 1836). En effet, l'observation des phénomènes, l'art de les coordonner dans un certain but et de reproduire à volonté date des premiers âges du monde. Et pourtant, « *ce n'est que d'hier, sans doute, que l'on peut dater les premiers essais de théories justes en chimie* » (Dumas, 1836, p. 5). La science chimique est née des différents arts de la chimie cultivés en Egypte et qui s'étaient répandus en Grèce. De ces arts, la science chimie n'a tiré que leur méthode : « *l'art de questionner la nature par les épreuves* » (Dumas, 1836).

A la différence des chimistes, l'enseignant de chimie traite des phénomènes assez familiers. Il joue le rôle de médiateur dans le processus de construction, par les apprenants, de concepts déjà formés. Son activité s'érige donc en « redécouverte ». Ces concepts « redécouverts » par l'apprenant doivent permettre d'expliquer des modifications d'aspects de la matière qui change de texture et de couleur, se métamorphose à vue d'œil par dissolution, effervescence ou évaporation. Pendant que le chimiste s'efforce à remonter de l'observation sensible aux causes cachées, l'apprentissage des concepts de la chimie par les apprenants suit un chemin tout à fait différent. D'après Laszlo (1993, p. 13), le récit chimique des métamorphoses des substances est double :

A un niveau primaire et phénoménologique, le texte des publications est descriptif ; les protocoles opératoires notent au passage les soudaines ébullitions ou éruptions, les précipitations ou les apparitions des louches dans une solution limpide. A un niveau plus abstrait, l'interprétation des signes d'un changement, le récit chimique est métaphorique ; il se donne des acteurs invisibles, empiriquement indécélables.

Dans ce deuxième niveau, les modifications observées par nos organes sensoriels et par les instruments qui en augmentent la portée sont projetées vers l'échelle macroscopique. Elles sont attribuées à des altérations de structure, à des bouleversements architecturaux dans les entités hypothétiques et invisibles, les molécules. Pour Laszlo, la chimie postule un monde microscopique peuplé de tribus très diverses, un théâtre où des acteurs singuliers sont engagés dans des rituels imprévisibles. L'apprentissage des concepts de la chimie demande une

navigation de pensée de l'élève en va-et-vient entre ces deux mondes, et cette navigation est elle-même gouvernée par la construction du sens aux multiples signes qui constituent la langue de la chimie. L'apprentissage et l'enseignement de la chimie reposent sur la représentation des connaissances sous forme de signes et de symboles. Bon nombre de chercheurs de nos jours reconnaissent une identité de troisième monde à ce système sémiotique.

2.2.2. La théorie atomique comme fondement des différents registres de représentation des chimistes

Comme toute science, la chimie se caractérise par des invariants qu'elle s'offre : « *son aporie fondatrice est là, dans la présence immuable, mais à combien mobile des atomes* » (Laszlo, 1993). La matière, telle que nous la connaissons est issue des combinaisons des atomes. Ses propriétés dépendent en principe de la nature des atomes, de la manière dont ils se réarrangent pour donner lieu à des édifices plus stables. Les chimistes cherchent à expliquer les phénomènes macroscopiques de la vie courante à partir des microstructures. Cependant, l'existence des microstructures manipulées dans les analyses chimiques n'est pas confirmée. D'après Laszlo (1993), la pratique des chimistes qui consiste à expliquer les phénomènes macroscopiques par les microstructures remonte à la naissance de la chimie moderne au 17^{ième} siècle. A l'origine de cette tendance à expliquer le tangible par le conceptuel, se trouve une révolution technique, l'invention du microscope qui a donné à la chimie moderne l'occasion de renouer avec les pensées atomistes de l'antiquité. La chimie conceptuelle (chimie microscopique) devient une sorte de dérivée théorique du microscope ; une sorte de rêverie inspirée, où des corpuscules dotés de forme et de consistance s'unissent en étranges étreintes (Laszlo, 1993). La théorie atomique fondée par John Dalton au 19^{ième} siècle, a mis plusieurs décennies pour s'imposer (Pullman & Gros, 1995). Les chimistes ont donc pensé ces objets moléculaires bien longtemps avant que les physiciens leur aient reconnu droit d'existence. En effet, nombre d'explications des chimistes font intervenir des espèces fictives auxquelles ils finissent par croire : électronégativité d'un atome, solubilité d'une substance, avancement d'une réaction chimique, constante d'équilibre, etc. le langage utilisé pour discourir du réel de manière chimique (à partir du codage incessant du visible par l'invisible) est donc un langage d'action comme celui prôné par Condillac. Le mérite d'avoir construit une langue cohérente pour décrire les phénomènes revient à Lavoisier. Il fut le premier à proposer un schéma (équation bilan) rendant compte de la transformation chimique en mettant en relation les anciennes et les nouvelles « substances » (Solomonidou & Stavridou, 1994). Ceci représentait un premier niveau de formulation de la

transformation chimique. Au fil des temps, les chimistes ont du faire recours à d'autres niveaux de formulation pour la modéliser.

2.2.3. Les niveaux de formulation de la transformation chimique

Après une étude épistémologique et didactique de la modélisation de la transformation chimique, Dumon et Laugier (2004) font ressortir trois niveaux de formulation de ladite transformation. Le niveau macroscopique basé sur l'assertion de Lavoisier selon laquelle :

On est obligé de supposer dans toute transformation chimique une véritable égalité ou équation entre les principes des corps que l'on examine et ceux que l'on retire par l'analyse. Ainsi puisque le moût de raisin donne du gaz acide carbonique et de l'alcool, je puis dire : moût de raisin = acide carbonique + alcool.

Dans ce premier niveau, aucun accent n'est mis sur la symbolique. On ne parle que de l'identité macroscopique des substances et

La transformation chimique peut être définie comme un processus de modification de la nature des substances en présence. Processus durant lequel la masse se conserve ainsi que les « éléments » constituant les corps. Les substances sont des corps purs caractérisés par leurs propriétés physiques et chimiques (Dumon & Laugier, 2004, p. 1133)

Le niveau « atomico-moléculaire » où un lien est établi entre l'expérience et le microscopique imaginé par Avogadro. Ici,

La transformation chimique devient un processus de réorganisation des « atomes » (unité de matière indivisible) des substances de départ, par lequel se forment de nouvelles substances. Au cours de la transformation, la masse, le nombre et l'identité des atomes se conservent. Cette transformation est symbolisée par une équation de réaction. Les substances peuvent être des corps simples ou composés, constitués d'atomes (identiques ou différents) unis entre eux par des « liaisons chimiques » (dont la nature n'est pas précisée) (Dumon & Laugier, 2004, p. 1135).

Le niveau physico-chimique qui comprend deux registres le registre macroscopique et le registre microscopique. Dans le registre microscopique,

La transformation chimique est un processus qui fait intervenir les électrons des couches de valence des atomes ; atomes unis par des liaisons covalentes au sein de molécules, ou sous forme d'ions. Durant la réorganisation des atomes des liaisons

se rompent, d'autres se forment. Les atomes sont constitués de particules subatomiques. Ils sont représentés par le symbole de l'élément correspondant, son numéro atomique, un nombre de masse, et possèdent une certaine structure électronique. Le nombre de liaisons (ou la charge des ions) qui peuvent être formées par un atome est lié à cette structure. L'équation de réaction symbolise le bilan de ce qui se passe à l'échelle microscopique lors des chocs entre molécules ou atomes (Dumon & Laugier, 2004, pp. 1136–1137).

Ce niveau de formulation requiert des connaissances sur la structure électronique de l'atome ainsi que les liaisons chimiques. Dans le registre macroscopique, « *la transformation chimique s'effectue à une certaine vitesse et conduit généralement à un état d'équilibre où coexistent les réactifs et les produits de la réaction.* » (Dumon & Laugier, 2004, p. 1138). Cette nouvelle approche prélève l'élève de la vision « statique » (Carreto & Viovy, 1994) de la réaction chimique et apporte des notions relatives à la cinétique de la réaction.

2.3. Les registres de représentation des savoirs en chimie

2.3.1. Le « chemistry triplet » de Johnstone (1982, 1991)

Johnstone (1982) est le premier auteur à élaborer une distinction entre les niveaux de savoir dans l'enseignement et l'apprentissage de la chimie. Se posant la question de savoir pourquoi la chimie est si difficile à apprendre, il débouche sur trois hypothèses explicatives : 1) la chimie en elle-même présente une nature difficile d'accès ; 2) La façon dont on enseigne la chimie fait émerger des problèmes ; 3) La façon dont les élèves apprennent la chimie entre en conflit avec les deux premiers points. Johnstone qu'il est fondamental de s'interroger sur les trois hypothèses en corrélation. Il s'est donc consacré à la description de la nature de la chimie, sous le double regard de l'enseignant et de l'élève. Il a décrit trois niveaux de pensée selon lesquels on peut aborder la chimie :

*There is the level at which we can see and handle materials, and describe their properties in terms of density, flammability, colour and so on. [...] A second level is the representational one in which we try to represent chemical substances by formulae and their changes by equations. This is part of the sophisticated language of the subject. The third level is atomic and molecular, a level at which we attempt to explain why chemical substances behave the way they do.*⁸ (Johnstone, 1982)

⁸ « Il y a le niveau auquel on peut voir et manipuler la matière, et décrire ses propriétés en termes de densité, inflammabilité, couleur, etc. (...) Un deuxième niveau est le niveau représentationnel dans lequel nous essayons

Cette première proposition se fonde sur une distinction de fonction entre les trois niveaux : le premier, assimilable au niveau de description, sert à décrire et caractérise par des propriétés observables (comme la couleur). Le deuxième, niveau de représentation, sert à représenter et s'articule autour des formules et des équations, mais aussi d'autres modes de représentations comme les graphiques (Johnstone, 2000). Le troisième, niveau d'explication, concerne le comportement des atomes et des molécules. Seulement, les modes de communication entre les différents niveaux ne sont pas précisés.

Le « chemistry triplet » utilisé dans les recherches en didactiques ces dernières années est une version améliorée du précédent, paru en 1991. Selon cette proposition, les contenus en chimie peuvent être répartis dans l'un ou plusieurs des trois niveaux de savoir (levels of knowledge) suivants : le niveau macroscopique, le niveau submicroscopique et le niveau symbolique (figure 1).

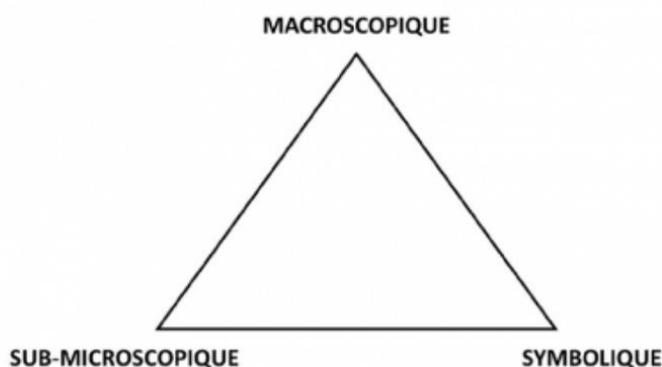


Figure 1: triangle de Johnstone (ou chemistry triplet) représentant les trois niveaux de savoir (levels of knowledge) en chimie : macroscopique, microscopique et symbolique (Johnstone, 1993)

Le niveau macroscopique, associé à l'expérimentation et la description, recouvre ce que l'on peut appeler le monde « perceptible ». Ace niveau, il est possible d'effectuer des descriptions qualitatives et quantitatives en se référant à des observations et de préciser des changements de propriétés chez les composés chimiques de début et de fin de réaction. Il constitue traditionnellement la première étape dans l'approche de la chimie : l'observable par

de représenter les substances chimiques par des formules, et leurs transformations par des équations. Cela constitue une partie du langage sophistiqué de la discipline. Le troisième niveau est atomique et moléculaire, un niveau auquel nous essayons d'expliquer pourquoi les substances chimiques se comportent d'une certaine manière » (Johnstone, 1982, p. 377, traduction de Dehon, 2018, p. 85)

l'expérience (Houart, 2009). Les deux autres niveaux appartiennent pour leur part à ce que l'on peut appeler le monde « construit » et s'inscrivent de ce fait, selon Johnstone, dans le domaine de la modélisation. Le niveau submicroscopique, impliquant les théories et modèles particuliers, constitue un niveau explicatif quand Johnstone confère au niveau symbolique, comprenant tous les signes de communication y compris le langage spécifique à la chimie, un rôle de représentation.

Ce modèle a eu de nombreuses répercussions sur d'autres décrivant, quant à eux, les relations entre le monde empirique et le monde des modèles. Houart (2009) voulant réconcilier ces modèles de représentation avec le « chemistry triplet » de Johnstone, propose le contenu de Chaque niveau de représentation en chimie. Elle obtient un schéma global permettant de synthétiser les différentes couches du « chemistry triplet ». Dans ce schéma, les niveaux de représentation sont : le macroscopique, le microscopique et le symbolique (figure 2).

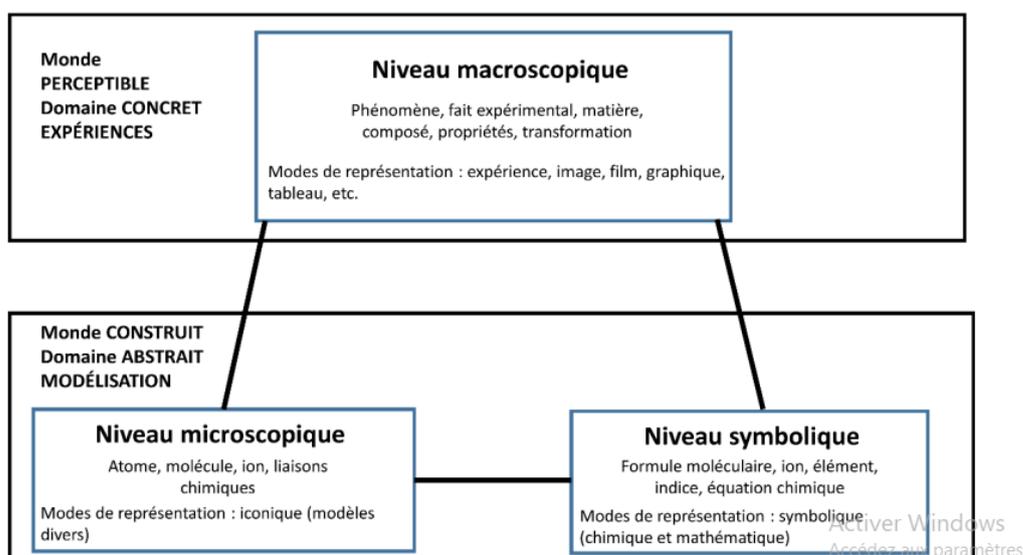


Figure 2: Représentation des trois niveaux de savoir de la chimie (version du « chemistry triplet »), de leurs modes de représentation et de leurs connexions (d'après Houart, 2009).

Cependant, de nombreux auteurs ont amendé le triangle de Johnstone en émettant un certain nombre de critiques portant notamment sur les niveaux de savoir macroscopique et symbolique (Gilbert & Treagust, 2009; Kermen & Méheut, 2009; Mzoughi-Khadhraoui & Dumon, 2012; Talanquer, 2011). Premièrement, le niveau macroscopique ne se limite pas au domaine empirique ou expérimental, il intervient également dans le domaine de la modélisation. En effet, le recours à des concepts descriptifs ou explicatifs comme les concepts de substance, de réaction chimique ou d'élément constituent déjà des modélisations émergeant au niveau macroscopique.

En conséquence, Kermen et Méheut ont introduit une représentation sous la forme d'un tétraèdre dans lequel le niveau macroscopique est scindé en deux parties distinctes : un niveau empirique et un niveau de modélisation macroscopique (Kermen & Méheut, 2009).

2.3.2. Le tétraèdre de Kermen et Meheut

Conscientes des problèmes entourant le contenu du niveau macroscopique, Kermen et Meheut scindent ce dernier en deux parties distinctes : un niveau empirique et un niveau de modélisation macroscopique (figure 3). En effet, de nombreux objets peuvent être considérés à la fois comme des constructions conceptuelles et comme des objets empiriques. C'est le cas, par exemple, d'une « substance » qui peut être soit caractérisée au niveau empirique (via des termes issus de la langue ordinaire), soit caractérisée comme un concept macroscopique (à l'aide de termes de la nomenclature chimique ou d'autres concepts de chimie, comme les propriétés de la substance). Plus encore, il s'agit ici de distinguer le monde empirique et perceptible (qui fait l'objet d'une description) du monde des modèles dont les fonctions sont plus larges : décrire (à l'aide de concepts plus formalisés), expliquer et prédire.

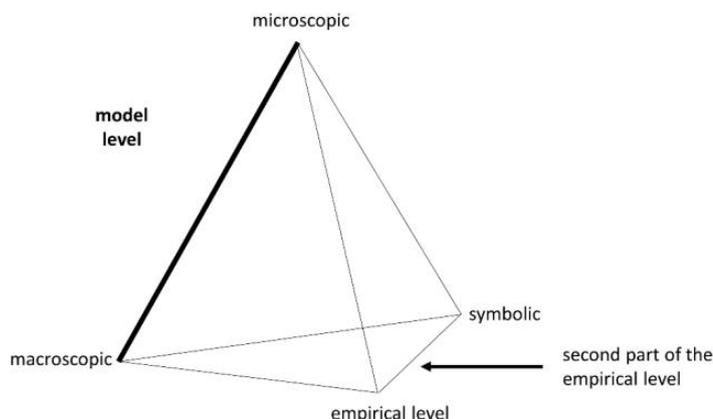


Figure 3: Tétraèdre représentant quatre niveaux de savoir en chimie : empirique, macroscopique, microscopique et symbolique (Kermen et Méheut, 2009).

Les auteures ne nient tout de même pas le problème de description empirique d'un phénomène. A titre d'exemple, pour décrire un phénomène comme l'oxydation du zinc dans une solution de sulfate de cuivre (II), on peut opérer de deux manières différentes, que Kermen et Méheut qualifient de première et seconde description du niveau empirique :

- La première description du niveau empirique se base sur l'utilisation de termes qui ne sont pas spécifiquement des concepts chimiques : « Un morceau de fil gris est plongé

dans un liquide bleu. Après un certain temps, le fil se couvre d'un solide rosé, et le liquide devient quasiment incolore. »

- La seconde description du niveau empirique se base sur l'utilisation de concepts chimiques, comme les espèces chimiques, les formules chimiques, la quantité de matière : *« Un fil de zinc est plongé dans une solution aqueuse de sulfate de cuivre (II). Après un certain temps, le cuivre métallique apparaît et les ions cuivriques disparaissent. »*

La seconde description du niveau empirique (qui peut prendre la forme de représentations symboliques comme des formules chimiques) pose de sérieux problèmes de justification. Kermen et Méheut ne nient pas que cette seconde description du phénomène soit déjà, dans un sens, un stade d'interprétation ou de représentation, et qu'elle puisse être considérée, à ce titre, comme relevant de la modélisation du phénomène. S'inscrivant à la suite de Martinand (2002), elles déclarent que les enseignants qui font usage de cette seconde description ignorent qu'elle est le résultat d'une conceptualisation ou d'une abstraction préalable du monde réel. Ils l'utilisent comme si c'était la réalité même. Pour les auteures, cette description appartient au niveau empirique et constitue en même temps une observation de ce qu'il se passe.

La particularité de ce modèle est qu'il considère le déplacement, la possibilité d'une évolution d'un niveau de signification à un autre. Ce déplacement s'effectue le long des arrêtes reliant les sommets du tétraèdre occupés par les différents niveaux de savoir et peut s'identifier par le mode de communication employé :

If a teacher describes what happens on the bench in terms of colour changing or a pH measurement, he/she is around the 'empirical level' corner. If he/she speaks of chemical reaction without any chemical formula, he/she is moving to the 'macroscopic' corner, and if he/she speaks of chemical reaction with chemical formula he/she shifts along the 'macroscopic-symbolic' side. When a teacher uses an animation to visualize the microscopic model and describes what is going on, he/she is around the 'microscopic' apex. If he/she interprets what happens in this visualization with the equation of an elementary chemical reaction, then he/she shifts along the side to the 'symbolic' apex⁹.

⁹ « Les personnes utilisant cette description ne sont pas conscientes qu'elle est le résultat d'une conceptualisation ou d'une abstraction préalable du monde réel. Elles l'utilisent comme si c'était la réalité même. Donc, nous considérerons que cette description appartient au niveau empirique, et constitue aussi une observation de ce qu'il se passe » (traduction libre de Kermen et Méheut, p. 26). 7 « Si un professeur décrit ce qu'il se passe sur la

Cette description faite par Kermen et Meheut fournit non seulement les critères d'appartenance à un niveau de savoir du tétraèdre, mais aussi les critères ainsi que les sens du déplacement d'un niveau à l'autre. Cependant, le contenu du niveau symbolique n'est pas spécifié.

Dehon (2018) montre une limite du tétraèdre qui réside dans les connexions entre le niveau symbolique et les autres niveaux ; limite qui semble pour Awomo Ateba (2022) semble constituer une « *avancée significative dans la définition des niveaux de savoir en chimie* ». Pour Dehon, les connexions entre le niveau symbolique et les autres niveaux se voient modifiées par l'insertion du niveau empirique. Ce qui entraîne une nécessité de conception d'une relation entre le niveau symbolique et le niveau empirique qui soit distincte de la relation entre le niveau symbolique et le niveau de modélisation macroscopique. Plus précisément, il admet que le lien empirique-macroscopique connecte le monde tangible et le monde des concepts macroscopiques, selon une démarche que l'on peut qualifier de « modélisation ». Mais si le lien empirique-symbolique implique cette même démarche de modélisation, il se double d'un changement langagier, délicat pour les élèves. En conséquence, la relation empirique-symbolique ne peut être considérée sur un même plan que la relation empirique-macroscopique. Il déduit que le niveau empirique peut être décrit selon trois voies différentes (Dehon, 2018):

- Directement via l'usage de la langue ordinaire (par exemple, le français) sans référence aucune (si cela est possible) aux modèles macroscopiques ou submicroscopiques chimiques. On se situe alors pleinement sur la pointe du triangle correspondant au niveau empirique dans le tétraèdre de Kermen et Méheut.
- Directement via des concepts macroscopiques et submicroscopiques essentiellement descriptifs, comme les concepts de substances ou d'états de la matière, ainsi que via l'usage d'un vocabulaire technique (erlenmeyer, bec Bunsen, etc.). On se situe alors sur l'arête du triangle reliant le niveau macroscopique (ou submicroscopique) au niveau empirique.

paillasse en termes de changement de couleur ou de mesure de pH, il/elle est autour du sommet correspondant au niveau empirique. S'il/elle parle de réaction chimique sans aucune formule chimique, il/elle se déplace vers le sommet correspondant au niveau macroscopique, et s'il/elle parle de réaction chimique avec des formules chimiques, il/elle se déplace le long de l'arête reliant le niveau macroscopique au niveau symbolique. Quand un professeur utilise une animation pour visualiser le modèle microscopique et décrit ce qui se déroule, il/elle est autour du sommet correspondant au niveau microscopique. S'il/elle interprète ce qu'il se passe dans cette visualisation avec l'équation d'une réaction chimique élémentaire, il/elle se déplace vers le niveau symbolique » (traduction de Kermen et Méheut, 2009, p. 28 par Dehon, 2018, p. 95)

- Indirectement via des représentations de ces concepts macroscopiques et microscopiques : équation de réaction, formules brutes, formules développées planes, etc.

Selon cette approche, il n'existe pas de relation directe entre niveau symbolique et niveau empirique : les formules et équations chimiques offrent en fait une autre représentation de la même relation, entre le niveau empirique et les niveaux macroscopique et submicroscopique. Le niveau symbolique est dès lors considéré comme une représentation des modèles (macroscopique et microscopique). Il ne serait donc plus au niveau de la modélisation. Il sert, d'après Kermen et Meheut (2009, p. 28), à nommer et décrire les différents composants des modèles macroscopique et microscopique et décrire les phénomènes (deuxième description du niveau empirique).

Le tétraèdre de Kermen et Meheut semble adapté à l'analyse de la transposition didactique du savoir de la chimie puisqu'il ne permet pas de prendre directement en compte les significations que les apprenants prêtent aux symboles utilisés dans l'enseignement de la chimie.

Selon Dehon & Snauwaert (2015, p.5), Johnstone et les auteurs précédemment cités semblent éprouver des difficultés à caractériser ce que recouvrent exactement les « niveaux » : sont-ce des niveaux de savoir (levels of knowledge), des niveaux de pensée (levels of thought), des niveaux de description (levels of description), des niveaux de représentation (levels of representation), des niveaux d'interprétation (levels of interpretation), des niveaux d'enseignement (levels of teaching) ? Reprenant l'interrogation de (Talanquer, 2011), Dehon & Snauwaert (2015) se demandent si on peut appliquer un même cadre théorique modélisant la manière d'interpréter ou de représenter un phénomène chimique, pour un élève et pour un enseignant ou plus encore si un élève débutant en chimie réalise-t-il les mêmes processus d'apprentissage, caractérisés par les mêmes niveaux, qu'un étudiant en fin de cycle. Il aboutit donc à la nécessité de distinguer le discours d'un enseignant qui, de par son statut d'expert, embrasse la quasi-totalité de l'« espace du savoir en chimie » du discours d'un élève qui, selon son niveau de maîtrise de la matière, peut emprunter des schémas de pensée différents. Par ailleurs, l'utilisation d'un signe sans explicitation par un enseignant peut référer à la fois aux concepts macroscopiques et aux concepts microscopiques alors qu'un élève peut n'y voir qu'une lettre ou un chiffre sans aucun lien avec le phénomène chimique observé. Dans le but de se placer du point de vue de l'élève, ils ont reconstruit un cadre théorique permettant de traiter la question des significations que les élèves prêtent à un symbole, un signe ou un terme présent dans l'équation de réaction.

2.3.3. Modèle des niveaux de signification de Dehon (2018)

L'auteur postule qu'un élève peut en effet construire des significations émergent à trois niveaux distincts à partir d'une visualisation donnée (figure 4) :

- un niveau de signification macroscopique dans lequel l'élève fait référence à l'observable en citant des observations empiriques (changement de couleur, disparition lors d'une réaction chimique, etc.) ou en utilisant des concepts macroscopiques tels que les concepts de substance, de métal, de solide, etc. (observations empiriques et les modèles macroscopiques descriptifs ou explicatifs font partie de niveau de signification). Notons qu'à ce niveau, l'élève peut décrire certaines propriétés de la substance considérée : états de la matière, brillance, dureté, malléabilité, conductivité thermique, etc. ;
- un niveau de signification microscopique dans lequel l'élève fait référence aux entités constitutives de la matière (molécules, atomes, ions), à la géométrie moléculaire, aux propriétés microscopiques ou aux particules subatomiques (électrons, protons, neutrons) ;
- Un niveau de signification symbolique dans lequel l'élève se limite à une lecture du ou des signe(s) en tant que signifiant : association de lettres, position dans une combinaison de symboles, chiffre dans une équation mathématique, etc. À ce niveau, l'élève peut aussi prêter à la visualisation une signification hors du cadre strict de la chimie. Les significations du niveau symbolique sont supposées s'éteindre rapidement au cours du cursus chez la majorité des étudiants pour faire place aux significations des niveaux microscopique et macroscopique.

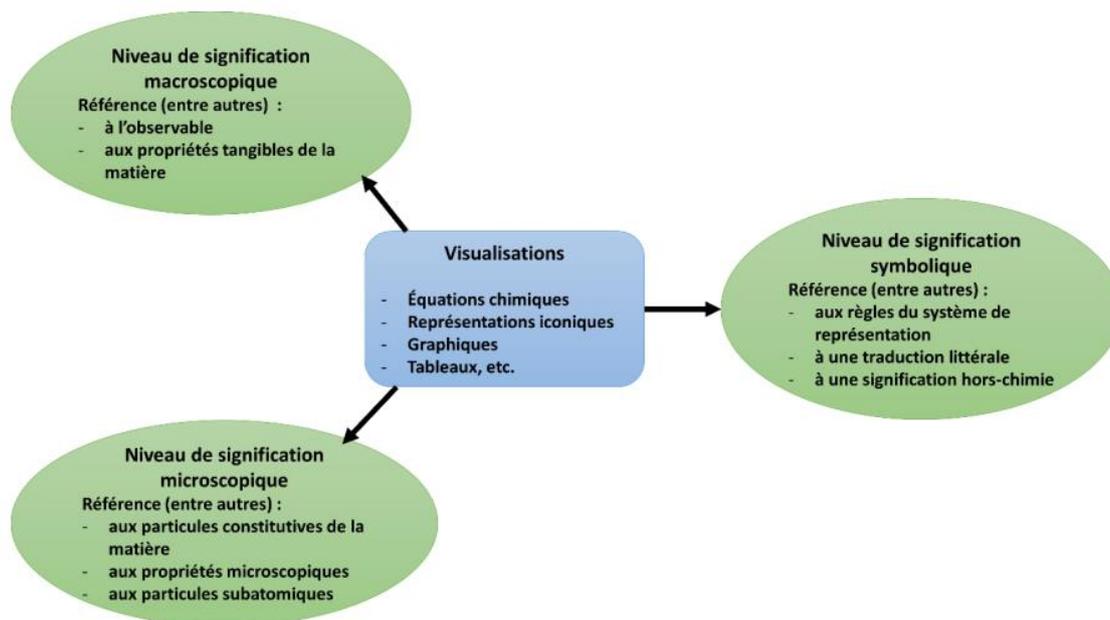


Figure 4: Schéma des niveaux de signification associés à une visualisation pour un jeune apprenant de chimie. (Dehon 2018, p. 110)

Si nous Prenons l'exemple du symbole chimique Na (figure 5). Au niveau macroscopique, il peut représenter la substance « sodium » avec toutes ses propriétés observables : solide mou et gris à température ambiante, présentant un éclat métallique sous certaines conditions, hautement inflammable, capable de réagir violemment avec l'eau, etc. Au niveau microscopique, « Na » peut représenter l'atome de sodium, et indirectement sa masse atomique relative, sa faible électronégativité, sa composition en particules subatomiques, sa capacité de liaison, etc. Ces caractéristiques microscopiques, véhiculées par le seul symbole « Na », se construisent tout au long du cursus. Au niveau symbolique, « Na » peut être vu comme une combinaison d'une lettre majuscule et d'une lettre minuscule ou encore traduit dans le langage spécifique à la chimie sous le nom de « sodium ». L'élève peut ne prêter aucun sens chimique (microscopique ou macroscopique) au symbole « Na » même s'il est capable de l'écrire et de l'utiliser en combinaison avec d'autres symboles.

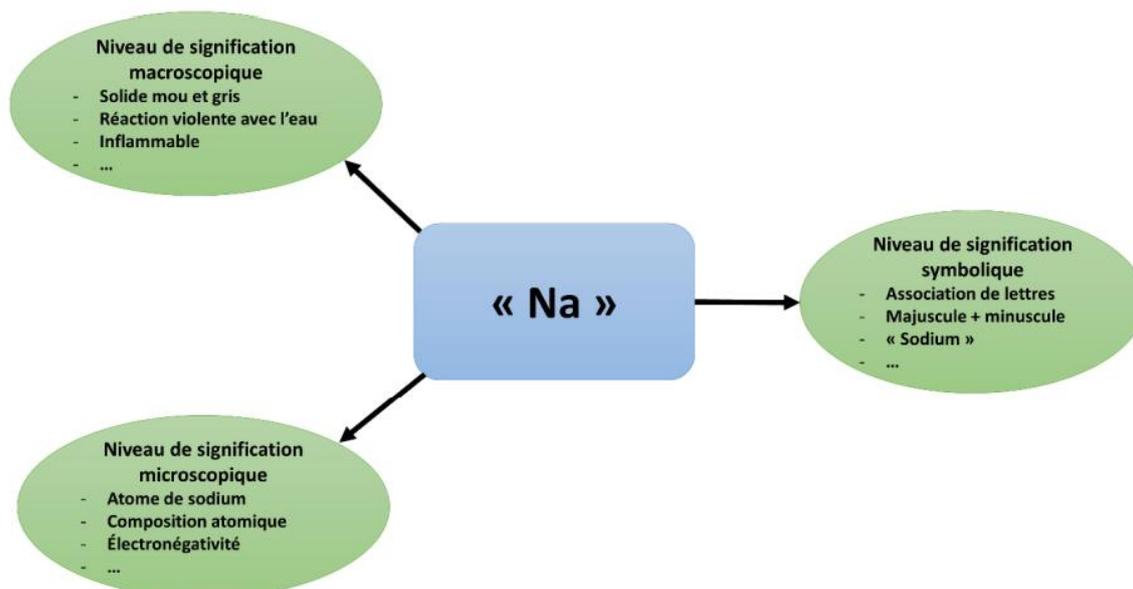


Figure 5: Schéma des niveaux de signification et exemples de significations associés au symbole « Na » (Dehon 2018, p. 111)

2.4. Enquête épistémologique sur le concept de stœchiométrie

Parlant de l'équation bilan de réaction, Laugier et Dumon (2004) disaient: «*Il serait illusoire de croire qu'alors que les scientifiques ont mis des siècles à la construire, les élèves seraient capables de l'utiliser [...] sans rencontrer de problèmes* » (Dumon & Laugier, 2004, p.1133). Nous pouvons nous permettre de faire la même remarque pour le concept de stœchiométrie. Ce décalage entre le temps long passé à forger un concept et le temps court dévolu à son enseignement-apprentissage plonge les enseignants dans un dilemme quotidien: comment aborder un savoir si riche en quelques heures de cours ? Comment choisir les points à mettre en évidence et ceux à passer sous silence ? Comment faire pour que les apprenants, rencontrant souvent les mêmes problèmes que ceux rencontrés par leurs glorieux ancêtres, puissent les résoudre dans le temps de la classe ? La réponse à ces questions se trouve dans les archives de la discipline. Nous pouvons nous poser la question de savoir comment s'est constitué le champ conceptuel de la stœchiométrie.

2.4.1. Naissance de la stœchiométrie

Le terme stœchiométrie fut proposé pour la première fois par Jeremiah Benjamin Richter (1762-1807). Szabadváry & Oesper (1962) racontent qu'après avoir servi dans le corps des ingénieurs de l'armée prussienne pendant sept ans, il quitta l'armée en raison d'un manque de discipline et se forma en chimie, où était réellement son cœur, en lisant des livres. Il entra à l'université de Königsberg en 1785 et étudia la philosophie et les mathématiques. Emmanuel Kant y enseignait

alors et le grand philosophe fit une profonde impression sur le jeune Richter. Il a été particulièrement influencé par l'affirmation kantienne selon laquelle toute discipline parmi les sciences naturelles est une véritable science que dans la mesure où elle contient des mathématiques. Richter a décidé de faire de la chimie une véritable science dans ce sens, c'est-à-dire de conférer un caractère mathématique à la chimie qui était alors un domaine purement empirique. Ce fut le début d'une chimie qui va au-delà de l'empirisme.

En 1792 Richter publie ouvrage intitulé "*Principles of Stoichiometry or the Art of Measuring Chemical Elements*"¹⁰, dérivé de la jonction entre deux termes grecs "stoicheion" signifiant élément et "metron" signifiant mesure :

I frequently was led during ohemical experiments to consider the problem whether and to what extent chemistry is really a branch of applied mathematics; it arose especially in the familiar finding that two neutral salts, on reacting with each other, again produce neutral compounds. The direct conclusion which I drew from this fact could be no other than that there must be definite weight relationships between the components of the neutral salts. From that time on I cogitated as to how these relationships could be discovered, partly by precise trials, and partly by combining chemical analysis with mathematical analysis Since the mathematical part of ohemistry deals mostly with materials that are indestructible substances or elements and teaches how the relative proportions between them are determined, I was not able to find a shorter or more fitting name for this discipline than the word stoichiometry irom orogrrrov, which in the Greek language denotes something which cannot be further subdivided, and μετρειν, which means finding proportions of magnitude¹¹(Richter, 1792)

¹⁰ Anfangsgrunde der Stochyometrie oder Messkunst Chymischer Elemente

¹¹ *J'ai souvent été amené, au cours d'expériences chimiques, à considérer le problème de savoir si, et dans quelle mesure, la chimie est vraiment une branche des mathématiques appliquées ; ceci est apparu, en particulier, dans la découverte familière, que deux sels neutres, en réagissant l'un avec l'autre, produisent à nouveau des composés neutres. La conclusion directe que j'ai tirée de ce fait ne peut être autre que l'existence de rapports de poids définis entre les composants des sels neutres. A partir de ce moment, j'ai réfléchi à la manière dont ces relations pouvaient être découvertes, en partie par des preuves précises, et en partie en combinant l'analyse chimique avec l'analyse mathématique... En effet, la partie mathématique de la chimie traite principalement des matériaux qui sont des substances ou des éléments indestructibles et enseigne comment les proportions relatives, entre eux, sont déterminés, je n'ai pas pu trouver un nom plus court et plus approprié pour cette discipline que le mot stœchiométrie de στοιχειον qui, dans la langue grecque désigne quelque chose qui ne peut pas être subdivisé, et μετρειν, qui signifie trouver des proportions de grandeur. (traduction par le logiciel DeepL de Richter (1762), cité par Szabadváry 1962, p. 268).*

La stœchiométrie représentait donc pour Richter l'art de mesurer les éléments chimiques¹².

En prenant appui sur des données empiriques, mais en se préoccupant essentiellement de la mathématisation, Szabadváry (1962) a interprété que, le vaste travail de Richter pouvait se résumer aux idées suivantes :

- ✓ Les composés ont une composition constante ;
- ✓ Si la même quantité d'un acide est neutralisée par des quantités différentes de deux bases, la neutralisation de ces quantités de ces bases nécessite des quantités égales d'un acide quelconque.
- ✓ Lorsque deux sels réagissent l'un avec l'autre, et si le rapport quantitatif de leurs composants est connu, le rapport quantitatif des composants dans les produits de la réaction peut également être calculé.

Pour illustrer cette dernière idée, Richter a dans ses livres donné une série d'exemples dans lesquels il a démontré mathématiquement la proportion entre les acides et les bases dans une réaction, sur la base des données expérimentales suivantes (Szabadvary, 1962):

A partir de 2400 grains¹³ de CaCO_3 , 1342 grains de CaO sont formés. Ainsi, *2400 grains de CaCO_3 forment 1342 grains de CaO*

Sachant également que 5760 grains de HCl réagissent avec 2393 grains de CaCO_3 , le résidu de l'évaporation, après allumage, pèse 2544 grains. Ainsi,

5760 grains de HCl réagissent avec 2393 grains de CaCO_3 pour former 2544 grains de résidu.

Il est donc possible de déterminer mathématiquement le rapport entre HCl et CaO qui serait de 5760 HCl pour 1337 CaO . Donc, *5760 grains de HCl neutralisent 1337 grains de CaO*

Considérant que le résidu de la réaction entre HCl et CaCO_3 formait 2544 grains de CaCl_2 et que Richter considérait que la masse du sel était le résultat de la somme des masses de la base et de l'acide, il était possible de calculer, en soustrayant la masse du sel (2544 grains) et la masse de la base (1337 grains), la masse d'acide pur utilisée (Richter, 1792). Par conséquent, *1207 grains de HCl pur neutralisent 1338 grains de CaO*

¹² D'après le titre de son ouvrage

¹³ Unité utilisée par Richter pour mesurer la masse

Aujourd'hui, les réactions chimiques étudiées par Richter sont schématisées par des équation bilan et leur exploitation permet de déterminer correctement la quantité de matière d'un produit formé connaissant la quantité de matière d'un réactif ou des réactifs pris dans les proportions stœchiométriques (niveau macroscopique) ainsi que le nombre d'atomes (respectivement de molécules) de produit formé(e)s connaissant le nombre d'atomes (respectivement de molécules) de réactifs (niveau microscopique). Il serait donc intéressant pour nous de vérifier que des élèves, après avoir reçu un enseignement sur l'exploitation d'une équation bilan de réaction soient capable d'effectuer avec succès de telles tâches.

Les travaux de Richter, ingénieux et originaux, n'ont malheureusement pas trouvé un accueil chaleureux auprès des scientifiques de cette époque-là. Szabadváry (1962) trouve plusieurs raisons à cela : premièrement, la complexité du langage utilisé par Richter pour exprimer ses idées. Deuxièmement, le premier volume a effrayé de nombreux lecteurs qui ont décidé de ne pas continuer. L'intention de Richter était, dans ce volume, d'instruire les lecteurs (chimistes) en mathématiques, domaine dans lequel, en général, ils n'étaient pas à l'aise. Vient ensuite la discussion de ce qu'on appelle la "stœchiométrie pure", qui est d'abord traitée sous forme condensée en deux pages. Ce bref traitement est suivi de toutes sortes de problèmes théoriques concernant la densité, l'affinité et les masses des composés, et les résultats sont démontrés à l'aide d'interminables équations mathématiques. La détermination des *Masszahlen*, c'est-à-dire des poids équivalents, est donnée dans les volumes 2 et 3 de ses livres, où est abordée ce qu'on appelle la "stœchiométrie appliquée".

Une autre erreur de Richter est qu'il a basé ses valeurs numériques sur des analyses de sels très incorrectes. La composition de divers sels avait été déterminée avec plus de précision par des chercheurs antérieurs. Par exemple, les analyses de sels publiées par Wenzel (1740- 1793) en 1777 étaient beaucoup plus précises. Enfin, Richter a essayé de trouver en chimie plus de régularités pouvant être exprimées mathématiquement qu'il n'y en a en réalité. Il avait une idée, qu'il essayait constamment de prouver, que les poids équivalents pouvaient être disposés en séries qui devaient présenter certaines régularités – il se trouvait limité par l'obstacle lié à l'idée première- Il mélangea ces nombres et les calcula sans cesse jusqu'à ce qu'il crût être parvenu à la preuve que les séries de masses des acides se conforment à de véritables progressions arithmétiques, tandis que celles des bases suivent des progressions géométriques. Il ne trouve pas de nombres correspondant à certains membres des progressions, et postule, comme Mendeleïev l'a fait en établissant la classification périodique des éléments, que ces lacunes

doivent appartenir à des acides et des oxydes encore inconnus. Cependant, les prophéties de Mendeleïev se sont avérées exactes, mais les prédictions de Richter se sont révélées fausses.

Si les contemporains chimistes de Richter ont abandonné la lecture d'un ouvrage à cause des démonstrations mathématiques fastidieuses qu'il contenait, nous pouvons nous poser la question de savoir quel impact une chimie présentée comme juxtaposition de chiffres et de lettres, mettant en avant l'aspect mathématique peut avoir sur les jeunes élèves des classes de troisième (élèves de 14-16 ans). A titre d'exemple, l'approche utilisée pour présenter l'exploitation de l'équation bilan dans le manuel officiel de la classe de 3^{ième}, établit une relation de proportionnalité entre quantité de matière initiale et coefficient stœchiométriques de toutes les espèces intervenants dans la réaction (réactifs et produits) et l'assimile à un inconnu « x ». Ce dernier fait très probablement appel, dans la tête des élèves aux équations mathématiques, pas toujours faciles à résoudre et par conséquent constitue une barrière à l'apprentissage de la stœchiométrie. Aussi le langage utilisé lors du déroulement de la leçon ne pourrait-il pas s'ériger en obstacle pour la construction des connaissances par les élèves ?

2.4.2. La conservation de la matière : théorie nouvelle pour la systématisation de la chimie

Parallèlement à Richter, les travaux d'Antoine Laurent de Lavoisier (1743-1794) ont également été fondamentaux dans la systématisation de la chimie, en raison de ses publications et expériences qui traitent des processus de conservation de la matière. Dans ce sens, Martins et Martins (1993) pensent que ce sujet s'est présenté implicitement tout au long de l'histoire de la science, soit à partir de réflexions philosophiques, dans des conceptions du monde, comme dans les œuvres d'Aristote, par exemple, dans lesquelles la conservation de la matière pourrait être interprétée comme « *la matière est ce qui reste constant quand quelque chose se transforme* » (de Andrade Martins & Martins, 1993, p. 245) ou encore, dérivés de faits expérimentaux, mais qui ne dénotent pas une délimitation du problème.

Avec les recherches sur les gaz atmosphériques, des études plus systématiques ont été réalisées, mais, comme jusqu'à la fin du XVIII^e siècle le rôle des gaz dans les réactions chimiques n'était pas encore compris, la conservation des masses ne pouvait pas être articulée (de Andrade Martins & Martins, 1993). En ce sens, c'est à partir de l'isolement de l'oxygène gazeux et de la systématisation de sa participation aux réactions chimiques, développée par Lavoisier, qu'il a été possible de penser de manière plus engendrée la conservation des masses dans une réaction. Selon Maar (2011), les idées de Lavoisier ont contribué à rationaliser la quantification, car, en plus d'utiliser des données empiriques, Lavoisier a traité de manière plus analytique ces informations, en s'attachant également aux questions de quantités.

Une expérience, parmi d'autres, réalisée par Lavoisier et qui comprend à la fois l'aspect quantitatif et la participation de l'oxygène, consistait à placer une quantité de phosphore, dont on déterminait la masse, dans une capsule d'agate à l'intérieur d'un récipient de verre lui a permis de conclure que :

Bien entendu, à l'aide de ces différentes précautions, il était facile de déterminer, 1e le poids du phosphore brûlé, 2e celui des paillettes blanches obtenues par combustion ; 3e le poids de l'oxygène gazeux qui s'est combiné avec le phosphore. Cette expérience me donna presque les mêmes résultats que la précédente : il en résulta aussi que le phosphore, en brûlant, absorba un peu plus d'une fois et demie son poids en oxygène. De plus, la certitude que le poids de la nouvelle substance produite était égal à la somme du poids du phosphore brûlé et de l'oxygène absorbé, ce qu'il était facile de prévoir a priori (Lavoisier, 1789, p. 63).

De la proposition d'Aristote à la compréhension flogistoniste de la combustion, la conservation de la masse n'était pas une condition primordiale jusqu'à la compréhension du rôle des gaz dans certaines réactions chimiques. Cependant, ce n'est qu'en comprenant la participation des gaz qu'il a été possible de signifier leur pertinence, modifiant l'interprétation des réactions d'un point de vue qualitatif, et surtout quantitatif.

Seulement, indépendamment de ces résultats, et de plusieurs autres, comme dans la combustion de l'alcool, dans les processus de fermentation et de calcination des métaux, Martins et Martins (1993) affirment que les conclusions de Lavoisier étaient toujours aprioristes par rapport à la conservation des masses, c'est-à-dire qu'il prenait comme prémisse l'idée que les masses se conservaient dans une réaction chimique. Néanmoins, Lavoisier a considéré cette notion comme quelque chose de pertinent au point de l'utiliser dans son travail, en plus d'être utilisée comme fondement contre la théorie du phlogistique (de Andrade Martins & Martins, 1993).

Plusieurs auteurs ont néanmoins défendu le principe de conservation de la matière, ce qui le rendait implicite dans plusieurs enquêtes de ce fait, bien que ledit principe soit contemporain à la mise sur pied, par Richter du concept de stœchiométrie, ce qui exclut l'hypothèse qu'il ait pu être influencé par cette idée. La conservation des masses, en ce sens, complétait l'idée de proportions constantes entre réactifs et produits, c'est-à-dire de stœchiométrie, supposée par Richter.

2.4.3. Stœchiométrie et réémergence de la théorie atomique

Szabadváry (1972) affirme que,

« [...] Les idées de Richter ont sans aucun doute influencé Dalton et Berzelius, à qui nous devons la théorie atomique et la détermination des poids atomiques, grâce auxquelles, le système de calcul stœchiométrique a été amené à son statut légitime en chimie » (Szabadvary, 1962, p. 270).

Dans cette perspective, les travaux de John Dalton (1766-1844) sur l'étude des gaz et la proposition de la théorie atomique, se sont conjugués pour que la stœchiométrie soit pensée non seulement en termes de rapports de masse, mais aussi en termes de composition dans les réactions chimiques. Michałowska-Kaczmarczyk et al. (2015) ont également déclaré que *« le concept de stœchiométrie était fondamental pour le développement de la théorie atomique de Dalton »*.

Dalton, vers 1803, compte tenu de ses études sur les pressions partielles et les différentes dissolutions des gaz dans les liquides, a peut-être cherché, à travers la formulation d'une théorie atomique, à justifier les situations avec les gaz (Maar, 2011; Szabadvary, 1962), en les reliant à une série d'autres concepts qui étaient consolidés et/ou en voie de consolidation. Dans cette optique, on comprend qu'un réseau conceptuel, tel que la stœchiométrie, se ramifie au fur et à mesure que de nouveaux concepts sont incorporés, et que de nouvelles situations sont comprises, grâce à de nouvelles compréhensions. Vergnaud (1982, 1990, 2013a) explique qu'un concept n'est jamais isolé et qu'il se forme toujours en relation avec d'autres concepts et situations. Dans le cadre de l'histoire, à mesure que les idées de conservation et de proportions étaient établies, d'autres scientifiques ont également utilisé ces hypothèses dans de nouvelles situations. C'est le cas de Dalton qui au cours la formulation de sa théorie atomique a fortement été influencé par les idées de Newton, Lavoisier, Proust et Richter.

Sous cet angle, Szabadváry (1966) a admis que la constitution de la matière par des atomes, et les éléments d'un même atome ont la même masse, ne sont pas les idées originales de Dalton. Toujours pour Szabadváry (1966), l'essence de la théorie de Dalton résiderait dans l'idée que les composés sont formés par l'union d'atomes entiers et que les différents atomes ont des poids différents, qui peuvent donc être exprimés par des nombres, et que, par comparaison, d'autres poids pourraient être établis, et par conséquent, détermineraient la composition des composés chimiques. Partant de ces prémisses, et au moyen de déterminations expérimentales, Dalton adopta l'hydrogène comme étalon pour la construction d'une table des poids atomiques, publiée en 1808

Dans son ouvrage de 1808, Dalton présente une proposition de représentation des éléments (figure 1) qui peuvent être simples (que l'on considère aujourd'hui comme des éléments chimiques), binaires, ternaires, etc. (que l'on appelle aujourd'hui des substances chimiques). Par conséquent, Dalton a stipulé, à travers cet établissement, un moyen de communiquer les relations mathématiques, proportionnelles, atomiques et de masse, entre les pairs de la communauté académique, cette représentation était donc pertinente pour la consolidation même de la théorie, car comme il le disait, chaque élément aurait un poids différent, il serait donc important de les présenter.

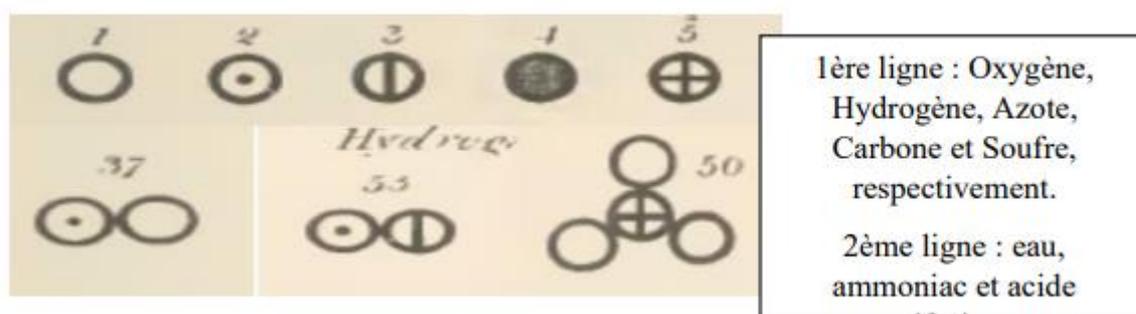


Figure 6: Représentation des éléments et des substances par Dalton tiré de Dalton (1808, P.561)

Cela dit, Szabadváry (1966) a discuté du fait que ce n'est qu'avec la détermination des valeurs de poids atomique que la stœchiométrie a commencé à être réputée dans l'analyse quantitative, car jusqu'alors, les travaux de Richter n'avaient pas été considérés comme concluants au point d'être utilisés.

Si la pertinence de ces travaux, tels que la conservation de la matière, la théorie atomique, la loi des proportions constantes, énoncée par Richter, gagnait en *statut* dans la communauté scientifique, certaines conjonctures manquaient encore d'études et de justifications. Par exemple, maintenant la molécule d'eau contenait un atome d'hydrogène et un atome d'oxygène, comme proposé par Dalton, cependant, Joseph Louis Gay-Lussac (1778- 1850) a vérifié expérimentalement que les proportions, en volume, étaient de 2 (deux) parties d'hydrogène pour 1 (une) partie d'oxygène (Maar, 2011) et, dans ce sens, certaines autres propositions qui étaient pertinentes pour les réactions chimiques ont été clarifiées en termes qualitatifs et quantitatifs.

2.4.4. Dépassement de la loi des proportions multiples

Lorenzo Romano Amadeo Carlo Avogadro (1776-1856) s'est ensuite attaché à intégrer les idées de Dalton et de Gay-Lussac et, pour tenter de justifier les deux visions de la formation de l'eau,

il a combiné la proportion des volumes de gaz de Gay-Lussac avec la théorie des proportions multiples de Dalton¹⁴. Pour cela, il admet, en s'appuyant sur des données empiriques, la possibilité que les molécules des gaz élémentaires comportent plus d'un atome, fait négligé par Dalton (Lipeles, 1983).

Outre la possibilité de molécules (terme souvent utilisé par Avogadro), d'un même élément, ayant plus d'un atome, selon Williams (2016), c'est grâce aux découvertes d'Avogadro que le monde moléculaire peut être dénombré, en raison de la publication de l'article *Essai sur une méthode de détermination des masses relatives des molécules élémentaires des corps, et des proportions dans lesquelles elles entrent dans ces composés*¹⁵, en 1811. Dans ce travail, Avogadro arrive à la conclusion que, si dans le même volume, dans les mêmes conditions de température et de pression, nous avons des masses proportionnelles de différentes molécules, cela est dû au fait que, probablement, il y a le même nombre de molécules. Dans cette perspective, l'exemplarité pour l'eau :

[...] il est évident que nous avons les moyens de déterminer très facilement les masses relatives des molécules des substances obtenues à l'état gazeux et le nombre relatif de ces molécules dans les composés, car, les proportions des masses des molécules sont alors les mêmes que les densités des différents gaz à température et à pression égales, et le nombre relatif des molécules dans un composé est donné immédiatement par la proportion des volumes des gaz qui le forment. Par exemple, étant donné que les nombres 1,10359 et 0,07321 expriment les densités des deux gaz oxygène et hydrogène par rapport à celle de l'air atmosphérique, et que la proportion des deux nombres représente par conséquent le rapport entre les masses de volumes égaux de ces deux gaz représentera également dans notre hypothèse la proportion des masses de leurs molécules. Ainsi, la masse de la molécule d'oxygène sera environ 15 fois celle de la molécule d'hydrogène, ou plus exactement 15,074 pour (Avogadro, 1811, p. 58).

Ainsi, Avogadro (1811) a déclaré que si dans un même volume d'hydrogène et d'oxygène nous avons des rapports de masse proportionnels, et comme ceux-ci réagissent toujours dans des proportions définies, ce rapport n'est possible que si nous avons le même nombre de molécules

¹⁴ Si deux éléments chimiques forment plus d'un composé, la proportion de la masse du deuxième élément qui se combine avec une masse fixe du premier élément sera toujours des proportions d'entiers simples.

¹⁵ "Um Ensaio Sobre um Método de Determinar as Masses Relativas das Moléculas Elementares dos Corpos e as Proporções nas Quais Elas Entram nestes Compostos"

(ou proportionnels) pour les deux composants de la réaction, dans les mêmes conditions. Dans ce cas :

Une demi-molécule d'oxygène + une molécule d'hydrogène forment une molécule d'eau intégrale

Les expressions « une demie molécule » et « une molécule » présagent la notion de coefficient stœchiométrique au niveau microscopique, mais la représentation reste littérale. En ce sens, Avogadro est le premier à écrire une équation littérale faisant intervenir les proportions entre les réactifs. Contrairement à ce que l'on croirait, ces proportions dérivent d'une double analyse expérimentale et critique (à la lumière des lois existantes), non pas d'un simple désir de conserver des éléments chimiques lors de l'écriture symbolique de l'équation bilan. Il se pose la question de savoir quelles sont les approches utilisées par les enseignants pour construire la notion de coefficient stœchiométrique et quel est le sens que les élèves y accordent ?

Avogadro a rompu avec certaines conceptions de Dalton, à savoir : il n'y aurait pas de gaz élémentaire comportant plus d'un atome, et l'eau serait composée d'un atome d'hydrogène et d'un atome d'oxygène. En associant et en contrastant certaines des conceptions de Dalton avec la notion de proportion dans les volumes de gaz de Gay-Lussac, Avogadro a élaboré son hypothèse. C'est à travers les travaux d'Avogadro, et leur contexte, que sont apparues les conceptions des proportions entre les réactions, la nécessité de délimiter les valeurs de masse des éléments chimiques, et les relations entre masses/volumes et particules.

2.4.5. De la nécessité de simplifier les symboles des « corps simples »

Soutenu par les concepts suscités et d'autres dans le même contexte, à la fin du 18^{ème} siècle, Jons Jacob Berzelius (1779 - 1848) est entré en contact avec l'ouvrage qui contenait les idées sur le nouveau système de Lavoisier, "*Eléments de la chimie antiphlogistique*"¹⁶. Dans ce titre, le système de combustion était justifié par des réactions avec l'oxygène. C'est ainsi que Berzelius a appris à connaître et à utiliser ce nouveau système dans ses travaux. Dans l'un d'eux, publié en 1814, le chimiste suédois proposait que les "corps simples" (que nous appelons aujourd'hui éléments chimiques) soient représentés par des symboles.

Les symboles chimiques doivent être des lettres, pour faciliter l'écriture et ne pas défigurer un livre imprimé. Bien que cette dernière circonstance puisse ne pas sembler d'une grande importance, elle doit être évitée autant que possible. Je

¹⁶ Anfangsgrunde der antiphlogistischen Chemie publié en 1792 par Christoph Girtanner

prendrai donc le signe chimique, la lettre initiale du nom latin de chaque substance élémentaire (Berzelius, 1814, p. 51).

La proposition a été élaborée sur la base de concepts consolidés et/ou en voie de l'être au début du 19^{ième} siècle, dont certains sont cités par Gonzalez et Silva (2013), à savoir : le modèle atomique nouvellement proposé par Dalton ; les travaux de Richter sur les proportions de l'eau et de l'air dans l'atmosphère. Les acides et bases, dans la formation des sels neutres ; la loi des proportions définies de Proust ; la loi des proportions multiples ; la loi des proportions réciproques ; la loi des proportions volumétriques de Gay-Lussac ; la théorie électrochimique dualiste et l'isomorphisme, proposés par Berzelius lui-même ; l'hypothèse d'Avogadro (partiellement acceptée) ; la loi de Dulong et Petit et l'analogie chimique.

Lorsque nous prenons en compte l'ensemble du cadre conceptuel dans lequel la proposition des symboles apportés par Berzelius contribue à poser les bases, nous pouvons réfléchir à la complexité des relations entre tous ces éléments. À tel point que la proposition du scientifique suédois rendait également possible la représentation des multiples proportions pour la formation des "corps composés" (substances chimiques). L'intentionnalité de cette relation est mise en évidence dans les propos de l'auteur :

Le symbole chimique exprime toujours un volume de la substance. Lorsqu'il est nécessaire d'indiquer plusieurs volumes, on le fait en ajoutant le nombre de volumes : par exemple, l'oxyde cuivreux est composé d'un volume d'oxygène et d'un volume de métal ; son symbole est donc $Cu + O$. L'oxyde cuivrique est composé d'un volume de métal et de 2 volumes d'oxygène ; son symbole est donc $Cu + 2O$. De même, le symbole de l'acide sulfurique est $S + 3O$; l'acide carbonique $C + 2O$; l'eau $2H + O$, etc. Lorsqu'on exprime le volume d'un composé du premier ordre, on jette le +, et on met le nombre de volumes au-dessus de la lettre : par exemple, $CuO + SO^3 =$ sulfate de cuivre, $CuO^2 + 2SO^3 =$ persulfate de cuivre. [...] Quant aux volumes (des composés) du second ordre, [...] nous le ferons en utilisant la parenthèse, comme on le fait dans les formules algébriques : par exemple, l'alumine est composée de 3 volumes de sulfate d'alumine et de 1 volume de sulfate de potassium. Son symbole est $3(AIO^2 + 2SO^3) + (Po^2 + 2SO^3)$ (Berzelius, 1814, p. 52).

Le système de notation développé par Berzelius a été affiné, mais sa genèse a été maintenue et a permis de systématiser et d'enseigner la chimie de la même manière, uniformisant ainsi la représentation des entités chimiques.

Après l'établissement des symboles, proposés par Berzelius, il y avait encore de grandes divergences pour les masses atomiques adoptées par les différents scientifiques, puisque chaque groupe utilisait des étalons de masse différents, ce qui entraînait des désaccords sur les formules de divers composés. En outre, plusieurs questions, toujours sans consensus en chimie, entravaient son développement. Le premier congrès international de chimie a été organisé en 1860 à Karlsruhe, en Allemagne, afin que les désaccords puissent être discutés. Lors de cet événement, plusieurs questions ont été abordées, notamment la normalisation des poids atomiques.

Dans ce sens, en plus de considérer le développement de la pensée sur la conservation de la matière, les relations proportionnelles entre les masses, les nombres de particules dans les réactions chimiques, l'attribution de symboles capables de médiatiser l'information contenue dans un système chimique, et la délimitation d'étalons de masse pour les éléments, deux autres concepts ont été pertinents pour la constitution de la stœchiométrie : la détermination du nombre d'Avogadro et la définition de la mole.

2.4.6. Le scepticisme d'Oswald face à la théorie atomique et le concept de mole

Wilhelm Ostwald (1853-1932) a proposé en 1900 le concept de mole, affirmant son scepticisme à l'égard de l'atomisme (Jensen, 2004). Cette perspective pourrait être justifiée, selon Furió et al. (1999), par le contexte de production de la chimie de la fin du XVIII^e siècle qui était essentiellement axée sur la détermination de la masse des substances et de leurs compositions respectives. Selon ces auteurs,

[...] on pouvait résoudre n'importe quel problème lié à la stœchiométrie sans avoir besoin de recourir à des interprétations de type atomistique. En revanche, l'autre grand objectif des chimistes de l'époque a été atteint : assimiler la chimie, en termes de "rigueur mathématique", à la physique (Furió-Mas et al., 1999, p. 361).

En ce sens, Ostwald pensait que les fondements de la stœchiométrie étaient plus sûrs s'ils continuaient à reposer sur des lois déjà fondées, comme celle des proportions multiples et des proportions constantes, que sur de simples suppositions, comme celle de l'atomisme (Furió-Mas et al., 1999).

Au milieu de ce scénario, Ostwald a utilisé le terme mol, un mot dérivé du latin signifiant "grande masse" (Jensen, 2004), se référant à une certaine quantité de masse d'une substance, attribuant essentiellement une signification tangible à ce fondement dans une tentative d'établir des relations macroscopiques avec les lois de la stœchiométrie (Jensen, 2004). Il définit ainsi

que "le poids normal ou moléculaire d'une substance exprimé en grammes, doit désormais être dit mol" (Ostwald, 2011, p. 163).

Ainsi, l'attention n'est plus mise sur le poids combinés des particules intervenant dans la réaction, mais davantage sur les relations entre les quantités de particules intervenant dans la réaction. Nous pouvons nous poser la question de savoir si les apprenants sont capables de déterminer la quantité de réactants intervenant dans une réaction, plus particulièrement la quantité de réactant A nécessaire pour la réaction avec une certaine quantité de réactant B.

Si d'un côté il y avait les questions sur la compréhension des particules dans un phénomène chimique, défendues par les atomistes, d'un autre côté, un autre courant de pensée défendait les proportions définies en masse. Ainsi, avec l'idée de la mole, il était possible, même si c'était de manière indirecte, d'établir des relations entre les particules, impossibles à compter, et les masses équivalentes, puisque tant les atomistes que leurs adversaires gardaient un rapport de pensée commun, celui des proportions en masses définies des substances. En d'autres termes, une circulation du macroscopique au microscopique était rendue possible grâce au concept de quantité de matière. Nous nous demandons si les élèves sont capables déterminer, à partir de la masse d'un réactif le nombre d'atomes ou de molécules d'un autre réactif ou d'un produit formé et vice versa.

Cependant, comme le rapportent Furió et al. (1999) :

Le problème des quantités dans les changements chimiques ne sera définitivement résolu qu'avec l'introduction de la grandeur de la quantité de substance dont l'unité sera la mole. Ceci est lié à la consolidation de la théorie atomique moléculaire, puisque, de ce point de vue, l'attention se porte davantage sur la relation entre les quantités de particules intervenant dans la réaction que sur les poids combinés. Cependant, l'extrême petitesse des particules rend difficile leur comptage direct au niveau submicroscopique (Furió-Mas et al., 1999, p. 363).

2.4.7. La détermination du nombre d'Avogadro

A partir de la considération d'Avogadro sur le nombre de particules étant égal dans un volume donné, pour différents gaz, certains scientifiques de l'époque ont essayé de déterminer, par des expériences, le nombre de particules contenues dans ces conditions. Cependant, le nombre le plus proche, de celui connu aujourd'hui, n'a été déterminé qu'en 1913 par Jean Baptiste Perrin (1870-1942), publié dans le livre "Les Atomes" (The Atomes) dans lequel il est parvenu à établir, par observation microscopique, la sédimentation de particules de gomme-gutte (un type

de sève) et en utilisant différentes équations pour différents phénomènes, la constante d'Avogadro, nom donné par Perrin en l'honneur d'Avogadro (Chagas, 2003).

Ainsi, grâce à la détermination de la constante d'Avogadro, effectuée par Perrin, il a été possible d'établir, pour une réaction chimique, des relations en masse, en volume, entre autres, avec un nombre fini de particules présentes dans cette masse ou ce volume équivalent. Ainsi, les réactions chimiques pouvaient être comprises en termes d'unités atomiques et/ou moléculaires et en termes de quantités mesurables, ce qui a contribué non seulement au développement et à la compréhension des termes quantitatifs des réactions, mais aussi à établir l'idée de l'atome, jusqu'alors réticente par certains savants de l'époque, comme Ostwald (Furió-Mas et al., 1999; Oki, 2009).

La reconnaissance de ces correspondances n'est devenue possible qu'avec la détermination de la constante d'Avogadro, publiée par Perrin en 1913, qui se basait non seulement sur des conceptions, mais faisait également appel à des équations mathématiques et à des vérifications empiriques fiables, grâce à la variété des expériences sur le même phénomène et à une technique raffinée. Ainsi, la délimitation de la constante ne pouvait être assumée sans que la théorie atomique soit prise en considération. En ce sens, Oki (2009) a déclaré que les découvertes de Perrin ont contribué à ce que les opposants à l'atomisme, tels qu'Ostwald, acceptent la théorie atomique.

Dans ce contexte historique, depuis la fin du XVIII^e siècle, avec les recherches et les publications de Lavoisier sur la conservation des masses, jusqu'au début du XX^e siècle, avec la détermination de la constante d'Avogadro par Perrin, les études quantitatives sur les réactions chimiques ont favorisé la compréhension des phénomènes empiriques et conceptuels en chimie, et actuellement la stœchiométrie imprègne cette science dans ses différentes instances de connaissance, comme la chimie physique, la chimie analytique, entre autres.

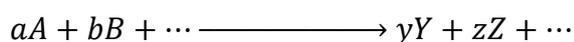
Cela dit, au cours de l'histoire, il a été possible de constater que les concepts n'ont jamais été au détriment des données empiriques ou en relation avec la mathématisation de la chimie elle-même. Par conséquent, le développement d'un concept n'était possible que lorsque ces aspects étaient intégrés, puis, à partir du moment où ces concepts étaient systématisés, ce qui serait une branche particulière de la chimie, à savoir la stœchiométrie, était consolidé.

2.4.8. La stœchiométrie aujourd'hui

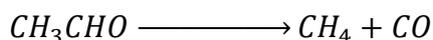
Pour certains auteurs, utilisés comme références dans l'enseignement supérieur, tels que (Atkins et al., 2018; Brown et al., 1995; Kotz et al., 2015; Russel, 1994), la stœchiométrie peut être

comprise comme un champ d'application de la chimie qui étudie les quantités impliquées dans les réactions chimiques et traite des relations entre quantité de matière, masses, formules, conservation des masses, entre autres. Actuellement, la stœchiométrie conserve toutes ces relations, conçues au fil de l'histoire, et est définie par l'Union Internationale de Chimie Pure et Appliquée (UICPA) comme suit :

Ce terme fait référence à la relation entre les quantités de substances réagissant dans une réaction chimique spécifique et les quantités de produits formés. L'équation stœchiométrique générale :



Fournit l'information que a moles de A réagi avec b moles de B pour produire y moles de Y et z moles de Z. La stœchiométrie d'une réaction peut être inconnue ou très complexe. Par exemple, la décomposition thermique de l'acétaldéhyde produit principalement du méthane et du monoxyde de carbone, mais aussi divers produits mineurs comme l'éthane, l'acétone et le diacétyl. L'équation stœchiométrique :



n'est donc qu'approximative. Même lorsque la stœchiométrie générale d'une réaction est bien définie, elle peut dépendre du temps, qui varie au cours d'une réaction. Ainsi, si une réaction se produit selon le mécanisme $A \rightarrow X \rightarrow Y$, et que X est formé en quantités substantielles au cours du processus, la relation entre les quantités de A, X et Y variera avec le temps, et aucune équation stœchiométrique ne peut représenter la réaction à tout moment (UICPA, 1997, p. 187.).

De cette façon, le champ conceptuel de la stœchiométrie peut être délimité par l'ensemble des concepts, représentations et situations qui l'ont composé historiquement et aussi à travers les fondements et les situations actuelles.

2.5. Revue de la littérature

2.5.1. Suffit-il de savoir équilibrer les équations bilan de réaction pour maîtriser la stœchiométrie ?

Laugier et Dumon (2004) ont entrepris une recherche portant sur l'équation bilan de réaction en questionnant d'une part le sens accordé à l'équation de réaction par les élèves qui semblent capables de l'équilibrer, et d'autre part les représentations de la réaction chimique que construisent les élèves lors de l'application des règles d'équilibrage des équations bilan. Leur

but était d'analyser les difficultés rencontrées par les élèves à la lumière des différentes étapes de l'élaboration historique du concept d'équation de réaction. Pour cela, ils ont administré, en 2000, un questionnaire à 112 élèves en début de seconde, puis effectué des entretiens avec dix élèves afin d'éclairer les réponses au questionnaire.

De leur étude épistémologique, il ressort trois niveaux de formulation de la transformation chimique :

Le niveau macroscopique où aucun accent n'est mis sur la symbolique. On ne parle que de l'identité macroscopique des substances et « *la transformation chimique peut être définie comme un processus de modification de la nature des substances en présence. Processus durant lequel la masse se conserve ainsi que les « éléments » constituant les corps. Les substances sont des corps purs caractérisés par leurs propriétés physiques et chimiques.* » (Dumon & Laugier, 2004, p.1133). Le niveau « *atomico-moléculaire* » où un lien est établi entre l'expérience et le microscopique imaginé par Avogadro. Ici,

La transformation chimique devient un processus de réorganisation des « atomes » (unité de matière indivisible) des substances de départ, par lequel se forment de nouvelles substances. Au cours de la transformation, la masse, le nombre et l'identité des atomes se conservent. Cette transformation est symbolisée par une équation de réaction. Les substances peuvent être des corps simples ou composés, constitués d'atomes (identiques ou différents) unis entre eux par des « liaisons chimiques » (dont la nature n'est pas précisée) (Dumon & Laugier, 2004,p. 1135).

Le niveau physico-chimique qui comprend deux registres le registre macroscopique et le registre microscopique. Dans le registre microscopique, qui requiert des connaissances sur la structure électronique de l'atome ainsi que les liaisons chimiques, « *la transformation chimique est un processus qui fait intervenir les électrons des couches de valence des atomes ; atomes unis par des liaisons covalentes au sein de molécules, ou sous forme d'ions. Durant la réorganisation des atomes des liaisons se rompent, d'autres se forment[...]* » (Dumon & Laugier, 2004, p. 1137). Dans le registre macroscopique, « *la transformation chimique s'effectue à une certaine vitesse et conduit généralement à un état d'équilibre où coexistent les réactifs et les produits de la réaction.* » (Dumon & Laugier, 2004, p. 1138). Cette nouvelle approche fait sortir l'élève de la vision « *statique* » (Carreto & Viovy, 1994) de la réaction chimique et apporte des notions relatives à la cinétique de la réaction.

Les auteurs relèvent cependant quelques difficultés chez les apprenants :

- Le terme équation, qui est sûrement emprunté aux mathématiques, fait naître, dans l'esprit des élèves, un recours à une égalité entre les deux membres de l'équation bilan de réaction : l'équation bilan reste au *niveau symbolique* (Dehon, 2018). Pourtant, il s'agit d'une conservation des éléments chimiques, pas du volume ou même de la quantité de matière.
- Difficulté à donner un sens aux indices présents dans les formules ainsi qu'aux « coefficients » (et à différencier ces deux nombres !).
- Décalage entre réussir à ajuster une équation de réaction et comprendre sa signification dans les registres macroscopique et microscopique : lorsque les élèves parviennent à ajuster les « coefficients » d'une équation de réaction, nombreux sont ceux qui ne réussissent pas à faire le lien entre les deux registres. Dans le niveau le plus élevé de compréhension l'élève perçoit les différentes significations des symboles chimiques et des coefficients numériques alors que dans le niveau le plus bas il s'agit d'une simple manipulation mathématique de signes.
- Résistance des élèves à la circulation entre les registres macroscopiques et microscopique. A l'issue de la classe de seconde, face à une transformation de la matière, l'élève doit utiliser l'équation de réaction pour réaliser un bilan de matière. Avec les moyens dont il dispose, il doit, pour réussir, circuler du macroscopique au microscopique afin de déterminer dans quelles proportions les substances réagissent, puis revenir au macroscopique en utilisant le concept de mole pour déterminer les quantités de matière nécessaires. Pourtant, cette circulation reste difficile. Lorsqu'il s'agit de lire une équation de réaction, leur lecture se fait dans le registre macroscopique (volume et masse) et quand, sous l'action d'un guidage serré de l'enseignant, ils doivent la lire au niveau microscopique, ils se révèlent incapables de revenir dans le registre macroscopique.

Domage que les auteurs n'aient pas clairement présentés les items de leur questionnaire, ni analysé les curricula pour mieux discuter des difficultés rencontrées par les élèves. Toutefois, leur brillant travail, en montrant clairement que l'opération d'équilibrage des équations bilans, mise en avant dans le curriculum Camerounais de chimie en classe de 3^{ième}, ne garantit pas une réelle conceptualisation des notions sous-jacentes, nous conforte dans notre élan de vérification du degré de conceptualisation de la stœchiométrie dans l'enseignement général Camerounais. Par ailleurs, les données de l'évolution historique du concept de réaction chimique et notamment les niveaux de formulations nous serviront de référence pour analyser l'approche

utilisée par les enseignants dans le but de définir la réaction chimique. Bien plus, ce travail apporte un plus à notre méthodologie : effectuer, après réponse au questionnaire, un entretien avec quelques élèves pour avoir des éclaircis par rapport à leurs réponses.

2.5.2. Stœchiométrie et théorie des niveaux de signification

Dehon et Snauwaert (2015) ont effectué une recherche une fois de plus sur l'équation bilan, mais en se penchant sur la question des sens qu'accordent les élèves aux symboles contenus dans l'équation bilan et leurs niveaux de signification. Leur but était de sonder les conceptions d'élèves de 16-17 ans associées aux symboles contenus dans l'équation de réaction. Pour cela, ils ont passé, à 130 élèves issus de trois écoles belges et des formations différentes tenus par des enseignants d'une ancienneté allant de 20 à 30 ans, un questionnaire papier-crayon comportant 8 items ouverts et portant sur la compréhension de la symbolique utilisée dans une équation de réaction ; en particulier la réaction de combustion du sodium.

L'analyse des réponses des élèves révèle:

- Que certains signes initialement à forte teneur symbolique, comme le coefficient stœchiométrique, véhiculent majoritairement des interprétations portant sur les niveaux microscopique et macroscopique. Le coefficient est le plus souvent associé à un nombre de molécules ou d'atomes chez les élèves sondés. Si cette interprétation peut être pertinente pour un exercice de pondération d'une équation chimique, elle sera peu utile dans le cadre de problèmes stœchiométriques. (page 19).
- Que les élèves présentent une forte tendance à permuter les rôles du coefficient stœchiométrique et de l'indice. Chose digne de remarque, Si une dizaine d'élèves utilise le terme « coefficient » à la place du terme « indice », aucun élève n'exprime la confusion inverse. Il apparaît que la non maîtrise de la distinction entre molécules et atomes ne peut qu'influer sur la signification donnée au coefficient et à l'indice.
- Des difficultés à expliciter ce que l'on entend par « réaction chimique ». Plus particulièrement, les représentations de la réaction chimique au niveau microscopique sont marginales : seulement un élève sur dix fait référence aux liaisons ou aux atomes. En conséquence, les élèves ne peuvent produire qu'une explication pauvre du processus réactionnel, limités par une boucle langagière (les réactifs réagissent) et des verbes peu précis (les réactifs s'assemblent), voire incorrects (les réactifs s'additionnent).

Si les conceptions recueillies par cet auteur semble aussi explicites, c'est sûrement parce qu'ils ont su créer un cadre théorique qui ségrège le discours de l'élève de celui de l'enseignant. Le

cadre théorique des niveaux de signification nous semble très intéressant puisqu'il permet de situer les représentations de l'élève dans un niveau dit « de signification » particulier ce qui par la suite permettra d'expliquer la difficulté à passer d'un niveau de savoir à un autre. Dans le cas de la stœchiométrie, concept carrefour entre niveau macroscopique et niveau microscopique, il est important de savoir d'avance où se situent les représentations des élèves.

Seulement, les questions posées par l'auteur ne mettent pas en lumière le rapport de confusion que les élèves font entre les quantités (quantités de matière, masse, volume,...) initiales des réactifs et les coefficients stœchiométriques. Une question portant sur la modélisation par les élèves de particules représentant l'état initial d'un système chimique dont on connaît l'équation bilan de réaction et les quantités de matières initiales des réactifs aurait révélé bien d'autres conceptions. Aussi, les acceptions des élèves par rapport à la notion de proportions stœchiométriques ne sont pas présentées dans ce travail.

2.5.3. Stœchiométrie et expérimentation

Laugier et Dumon (2004) ont effectué une recherche portant sur une approche expérimentale de stœchiométrie en seconde. Ils aspiraient à élucider ce qui entre en jeu lors d'un processus d'apprentissage où les élèves sont engagés dans une démarche de résolution de problèmes impliquant l'utilisation de l'équation de réaction et du concept de mole pour établir un bilan de matière. Pour atteindre cet objectif, ils ont proposé à un total de 52 élèves venus de deux classes de seconde une série de situations relatives à la précipitation de l'hydroxyde de cuivre en référence à la théorie des situations didactiques. L'échantillon était constitué d'élèves familiarisés au travail par les situations problèmes mais n'ayant pas encore appris le bilan de matière. Lesdites situations problèmes étaient construites en accord avec l'hypothèse selon laquelle : « *le passage à un enseignement scientifique ne peut se faire que par une problématisation (établissement des raisons) qui se réalise, en particulier, par la caractérisation, la mise en tension critique de ce qui relève du registre empirique et de ce qui appartient au registre des modèles* » (Orange, 2006, p. 63).

Convaincus, en accord avec leurs devanciers, que la modélisation de la transformation chimique à l'aide de l'équation de réaction ne peut se faire que par une circulation entre les registres macroscopiques (expérimentation) et le nanoscopique (modélisation) ; le concept de mole étant au carrefour de ces deux registres, les auteurs ont tenté de prouver que « *c'est la difficulté rencontrée par les élèves dans la mise en relation de la phénoménologie macroscopique observée avec une phénoménologie nanoscopique imaginée qui ne leur permet*

pas d'utiliser correctement le registre symbolique pour rendre compte de la transformation chimique » (Laugier & Dumon, 2000).

Ils aboutissent aux résultats suivants :

- Plus des trois quarts des élèves affirment qu'il ne restera aucun des ions cuivre et hydroxyde après avoir mélangé une solution de sulfate de cuivre et une solution d'hydroxyde de sodium car ils auront tous réagi et se trouveront tous dans le précipité à la fin de la transformation quelles que soient les proportions dans l'état initial. Ces résultats montrent qu'un grand nombre d'élèves ne conçoivent pas qu'il puisse rester l'un des deux réactifs à la fin d'une transformation chimique lorsque les réactifs sont des solutés. Ils ont donc des difficultés à percevoir la stœchiométrie.
- Une fois que les élèves ont perçu la nécessité de prendre en compte la question de la proportionnalité dans une réaction chimique, une autre difficulté apparaît. Ils doivent en effet comprendre que les grandeurs proportionnelles sont les quantités de matière des différents réactifs. Or, spontanément, la majorité des élèves ont cherché à mélanger les « bons » volumes ou les « bonnes » masses. Ils prennent donc difficilement conscience de l'existence d'un niveau nanoscopique. En effet, lorsqu'ils pensent qu'il est impossible de déterminer le nombre d'ions en solution, cela constitue une première étape vers la résolution du problème. Seulement, leur lecture de l'équation n'est pas celle attendue par les enseignantes qui les guident en essayant de leur montrer que le dénouement se trouve dans l'équation de réaction. Prenant conscience que le coefficient stœchiométrique 2 signifie 2 fois plus d'ions cuivriques que d'ions hydroxydes, ils font se poser la question de savoir : « *comment compter les ions en solution ?* »

La construction du concept de stœchiométrie se fait contre de solides bases installées chez les élèves. Grace à l'expérimentation, il est possible de faire comprendre aux élèves que, du point de vue macroscopique, le déroulement d'une réaction ne nécessite pas des quantités particulières de réactifs, de mettre en évidence les réactifs en excès et éventuellement en défaut pour ainsi montrer que l'équation bilan ne rend compte que de ce qui est transformé. Seulement, l'expérience ne permet pas de faire comprendre aux élèves qu'au cours d'une réaction chimique, les réactifs réagissent selon les proportions de l'équation bilan, que la mole est l'outil de passage du macroscopique au microscopique (en réponse à la question « *comment compter les ions dans une solution* »), la notion de facteur ou rapport stœchiométrique, en clair de construire globalement la stœchiométrie. Les auteurs soulignent, par leurs travaux la difficulté des élèves à passer du niveau macroscopique au niveau nanoscopique. Connaitre les niveaux

de significations des différents concepts du réseau notionnel de la stœchiométrie pour ces derniers permettra certainement de mieux cerner cette difficulté et à l'avenir de trouver une meilleure voie de conceptualisation de la stœchiométrie.

2.6. Etude de la transposition didactique du concept de stœchiométrie en classe de 3^{ième} de l'enseignement secondaire général Camerounais

2.6.1. Du savoir savant au savoir enseigné

La notion de transposition naît en sociologie avec Verret qui cherchait à désigner un phénomène qui dépasse l'école et les disciplines d'enseignement. « *Il s'intéressait à la façon dont toute action humaine qui vise la transmission de savoirs est amenée à les apprêter, à les mettre en forme pour les rendre « enseignables » et susceptibles d'être appris.* » (Perrenoud, 1998,p.489). Cette notion est devenue d'usage courant en sciences de l'éducation et notamment dans les diverses didactiques des disciplines. Il importe cependant de préciser le champ d'application de la transposition selon les didacticiens. Chez Verret, la notion de transposition se limitait déjà aux savoirs. Les didactiques des disciplines ont encore fortement rétréci le champ d'application de la notion de transposition :

- à la forme scolaire, alors que Verret se situait dans une perspective historique et anthropologique plus large ;
- aux disciplines, comme champs de savoirs institués dans l'université et par conséquent dans l'école ;
- aux savoirs savants, alors que Verret s'intéressait à tous les savoirs transmissibles. (Perrenoud, 1998, p. 5).

Depuis Chevallard, la transposition didactique est vue comme moyen de liaison entre les savoirs enseignés et les savoirs savants. Elle est par conséquent plus adaptée aux disciplines mettant les savoirs savants au-devant de la scène à savoir les mathématiques, les sciences naturelles et humaines. Pour rendre justice aux sciences qui n'obéissent pas à ce critère, (Johsua, 1996) introduisit le concept de savoirs experts. Martinand (1993) lui emboîta le pas en parlant de pratiques de référence. Désormais, il existe deux sources pour la transposition didactique : les savoirs savants ou experts et les pratiques de référence.

D'après Perrenoud (1998), le processus de transposition didactique se passe en trois étapes. Primo, la transformation des savoirs et des pratiques en programmes scolaires, qu'on peut aussi appeler curriculum formel ou prescrit. C'est ce que Chevallard a nommé la transposition didactique externe. Secundo, la transformation des programmes en contenus effectifs de

l'enseignement. C'est la transposition interne, qui relève largement de la marge d'interprétation, voire de création des enseignants. Chez Chevallard, la chaîne se limite au parcours des savoirs, de l'état de savoirs savants à l'état de savoirs à enseigner (transposition externe), puis de l'état de savoirs à enseigner en savoirs enseignés (transposition interne). Tertio, le processus d'apprentissage, d'appropriation, de construction des savoirs et des compétences dans l'esprit des élèves. Qu'il y ait là une étape nouvelle et décisive dans le parcours du savoir et de la culture, nul n'en doute.

L'opportunité d'inclure cette dernière étape dans le processus de transposition didactique fait l'objet de nombreux débats. Pour notre recherche, nous jugeons judicieux de l'inclure étant donné que nous nous intéressons aux conceptions des apprenants, elles qui sont les manifestations tant du niveau d'apprentissage atteint par l'apprenant que de la qualité des transpositions didactiques interne et externe.

La notion de transposition didactique présente des spécificités qu'il convient de présenter. A la suite des travaux de Verret (1975), Chevallard (1980, 1985) a pris le soin d'établir que les objets de savoir à enseigner ne peuvent nullement s'analyser comme des « simplifications » d'objets plus complexes provenant de la société « savante ». Au contraire, ils sont les résultats d'un apprêt didactique, d'une construction qui les en fait différer qualitativement (au sens d'Halbwachs).

2.6.2. Les contraintes de la transposition didactique

Le savoir à enseigner se présente comme un « *texte de savoir* » (Johsua & Dupin, 1993, p. 195). Cette mise en texte du savoir s'accompagne de plusieurs opérations pouvant constituer ce que nous nommerons contraintes didactiques.

Chevallard distingue deux types de contraintes qui conditionnent la transformation des objets de savoir en objets d'enseignement :

- Des contraintes externes liées à la place du système d'enseignement dans la société et aux relations qu'il est appelé à entretenir avec son environnement ;
- Des contraintes internes qui interviennent dans le traitement par lequel un objet de savoir, désigné pour être enseigné devient objet d'enseignement.

Les contraintes internes constitueront notre centre d'intérêt dans le cadre de la présente étude. Chevallard, empruntant les mots de Verret, énumère cinq contraintes inhérentes au système didactique : la désynchronisation du savoir, la dépersonnalisation du savoir, la publicité du

savoir, la programmabilité du savoir et le contrôle social des apprentissages. Nous ferons emphase sur la désynchronisation et la programmabilité des savoirs appliquées au concept de stœchiométrie en classe de 3^{ème} (élèves de 14-16 ans).

La désynchronisation du savoir fait référence au découpage d'un savoir complexe en champs spécialisés : les liens qui existaient entre les éléments de savoir des chercheurs sont rompus (Chevallard & Johsua, 1985). On a une double conséquence : le savoir scientifique perd sa cohérence et est « *extrait de l'environnement épistémologique où il s'est initialement ancré* » (Johsua & Dupin, 1993). « *A la désynthétisation du modèle savant en vue de son introduction progressive, celle-ci ajoute une rupture temporelle entre les expositions didactiques du phénomène et celles du (des) concept(s) et par la séquentialisation des niveaux d'approche du problème.* » (Joshua & Dupin, 1993, p. 205). Cette rupture se situe, en situation de classe, « *entre le registre empirique et le registre des modèles* » (Awomo Ateba, 2022, p. 84). Les chercheurs préconisent dans ce cas un recours systématique à l'expérimental ou au concret comme points de départ d'un enseignement. Nous nous demandons donc quels sont les points de départ privilégiés par les manuels scolaires et les enseignants de chimie des classes de troisième (élèves de 14-16 ans) pour introduire l'étude quantitative d'une réaction chimique au moyen de la stœchiométrie. Plus précisément, quels sont les registres de prédilection des auteurs de manuels et des enseignants de chimie de troisième (élèves de 14-16 ans) pour amorcer l'étude quantitative d'une réaction chimique ?

La programmabilité du savoir est entendue comme l'organisation du savoir de manière linéaire selon un ordre "logique" dans un temps accordé par les institutions officielles et défini dans les programmes scolaires pour aborder une notion (Özgür, 2004). Elle « *tient au fait qu'un savoir étendu ne peut être assimilé en une fois et passe par un chemin de formation balisé* » (Perrenoud, 1999, p.3). Son but déclaré est d'améliorer l'enseignement et les apprentissages correspondants.

Du point de vue du savoir enseigné, il existe des adaptations propres à chaque enseignant raison pour laquelle il est important, comme le soulignent (Arsac et al., 1989) de distinguer une progression légale et une progression logique.

- La progression légale est définie par les programmes et fixe l' « âge légal » pour les principaux apprentissages et pour l'acquisition des différentes notions.
- La progression logique règle la linéarité du cours. En effet, le savoir à enseigner est amené à faire progresser l'élève suivant une contradiction « ancien-nouveau »

(Chevallard & Johsua, 1985). Cette contrainte, selon ce dernier, impacte de façon indéniable non seulement le choix des objets de savoir à transposer, mais aussi certaines transformations appliquées à ces objets.

2.6.3. Analyse de la transposition didactique du concept de stœchiométrie dans le programme, le manuel scolaire puis les notes de cours des enseignants de la classe de troisième

2.6.3.1. Analyse descriptive des programmes des classes de 4^{ième} et 3^{ième} de l'enseignement secondaire général Camerounais

Le concept de stœchiométrie est indissociable de celui de réaction chimique. Dans ce sens, l'étude d'une réaction chimique est introduite au secondaire Camerounais en classe de quatrième (élèves de 13-15 ans) où elle reste qualitative, se limitant à l'identification et quelques fois la mise en évidence des espèces ayant disparu (réactifs) et des espèces formées (produits). Elle se poursuit en classe de troisième (élèves de 14-16 ans), touchant cette fois son aspect quantitatif. Etude quantitative d'une réaction rime avec stœchiométrie de réaction. Initier les élèves de la classe de troisième (élèves de 14-16 ans) à l'étude quantitative des réactions chimiques peut donc s'assimiler à les amener à construire des bases solides en stœchiométrie. Dans ce contexte, nous examinons, dans le programme officiel de troisième en vigueur dans les lycées et collèges du Cameroun, la transposition du concept de stœchiométrie. A cet effet, nous jetons notre dévolu sur toutes les parties dudit programme abordant un concept du réseau notionnel de la stœchiométrie établi à l'issue de l'analyse historique dudit concept à savoir : la conservation de la matière, la représentation symbolique des éléments, le nombre d'Avogadro, la notion de mole, les relations proportionnelles entre les quantités de réactifs d'une réaction chimique, l'équation bilan.

En classe de troisième (élèves de 14-16 ans) de l'enseignement secondaire général Camerounais, la chimie fait partie intégrante d'une discipline appelée PHYSIQUE – CHIMIE – TECHNOLOGIE (PCT) visant à initier l'apprenant à la chimie, la physique et aux éléments d'ingénierie. Ledit programme comprend quatre modules (parties).

Le concept de stœchiométrie se retrouve, implicitement dans la séquence consacrée à l'étude d'une réaction chimique (Notion de réaction chimique). Cette dernière prescrit l'enseignement des savoirs suivants : définition de la réaction chimique, des réactifs, produits, équation bilan ; loi de conservation de la matière au cours d'une réaction chimique ; réaction entre le fer et le soufre. Les objectifs attendus au bout de ladite leçon sont entre autres:

- Schématiser une réaction chimique par une équation bilan
- Ecrire et équilibrer une équation bilan d'une réaction chimique
- Montrer la conservation de la matière au cours d'une réaction chimique
- Exploiter une équation bilan d'une réaction chimique.

En classe de troisième, la séquence sur la notion de réaction chimique veut, en plus d'introduire chez les élèves de nouveaux concepts à l'instar de la mole, et de l'équation bilan de réaction, les initier à l'établissement des bilans quantitatifs en chimie et par conséquent à « l'arithmétique chimique ». Selon Barlet & Plouin (1994, P. 46), « *On parle quelquefois d'arithmétique chimique pour évoquer la stœchiométrie des réactions* ». En d'autres termes, pour atteindre son objectif d'initiation des élèves à l'arithmétique chimique, le programme d'enseignement secondaire Camerounais devrait permettre la construction efficace de la stœchiométrie. Pourtant, à première vue, ce concept ne semble pas être un objet d'enseignement dans ladite classe puisqu'il n'apparaît aucunement dans la liste des savoirs prescrits. Cependant, un regard plus attentif jeté sur les savoir-faire attendus nous laisse comprendre que le concept de stœchiométrie se trouve dans l'ombre d'un autre : le concept d'équation bilan qui, dans cette séquence, est central au regard des objectifs visés. Ce choix des concepteurs de programmes peut se justifier par cette pensée de (Barlet & Plouin, 1994) « *l'équation bilan est l'outil privilégié pour résoudre les problèmes quantitatifs de chimie* ». Mais cette fixation sur l'équation bilan n'est sans doute pas sans conséquence. L'analyse de la traduction de ces objectifs dans le manuel scolaire de 3^{ème} pourrait nous donner plus d'éclaircissements.

2.6.3.2. Analyse de la présentation du savoir relatif à la réaction chimique dans le manuel scolaire officiel de la classe de troisième

Dans ce paragraphe, nous faisons donc une analyse de la présentation de la notion réaction chimique dans le manuel scolaire officiel à savoir PHYSIQUE – CHIMIE – TECHNOLOGIE 3^{ème}, collection DEWATEK, Editions TINCYD, programme de décembre 2014 utilisé par les enseignants et élèves des classes de troisième de l'enseignement général Camerounais. Cette analyse porte sur deux principaux aspects : un aspect didactique qui questionne la conformité du manuel avec le programme officiel ainsi que son impact sur la préparation des cours par les enseignants et les apprentissages des élèves ; et un aspect épistémologique qui fait emphase sur le statut de chaque concept fondamental convoqué dans l'étude de la stœchiométrie d'une réaction à la lumière de la théorie didactique des niveaux de savoir en chimie.

- Sur le plan didactique, nous recherchons, dans le manuel analysé : les leçons qui traitent de la mole et de la réaction chimique, les objectifs assignés à l'introduction de la notion

de mole et à l'étude de la réaction chimique, la présentation des contenus relatifs à la notion de mole et à la réaction chimique, enfin les activités recommandées par le manuel pour l'introduction du concept et la réaction chimique.

- Sur le plan, épistémologique, nous recherchons, dans le manuel analysé : le statut du coefficient stœchiométrique, la signification donnée à la loi de conservation de la matière, le statut de la notion de mole, la définition des réactifs et produits, le symbolisme de la réaction chimique, l'exploitation d'une équation bilan dans le but de prédire les difficultés potentielles des élèves.

Notre lecture des manuels sera guidée par les questions suivantes : quelle définition le manuel donne-t-il des notions de réaction chimique, réactifs, produits ? Comment symbolise-t-on une réaction chimique ? Comment aborde-t-on la conservation de la matière ? Quel est le statut du coefficient stœchiométrique ? Dans quels niveaux de représentation se situe le discours utilisé pour décrire chaque concept ?

2.6.3.2.1. La définition des concepts de réaction chimique, réactif et produit dans le manuel de 3^{ème}

Rappelons que la notion de réaction chimique est introduite en classe de 4^{ème} au moyen d'une étude qualitative de la réaction de combustion. A ce niveau, après identification des réactifs et produits, les élèves doivent être capables d'écrire l'équation littérale de ladite réaction. Pour les auteurs du manuel, cette nouvelle étude en classe de troisième, permet de renforcer les acquis de la classe précédente puisqu'ils écrivent : « *Après l'étude des combustions faites en classe de 4^{ème}, l'apprenant approfondira la notion de réaction chimique dans cette unité à travers l'acquisition de la loi de conservation de la matière, de l'écriture des équations bilans équilibrées de réaction et de leur exploitation* » (DEWATEK, p. 24). Les objectifs assignés à « l'unité » 4 du manuel intitulée « notion de réaction chimique » sont conformes à ceux prescrits par le programme et formulés sous forme de questions : « *qu'est-ce qu'une réaction chimique ? Un réactif ? Un produit ? Que stipule la loi de conservation de la matière ? Qu'est-ce qu'une équation bilan ? Comment l'équilibrer ? Comment l'exploiter ?* » (p. 24).

Cette unité est abordée au moyen de deux activités portant sur la réaction entre la limaille de fer et la fleur de soufre. Partant de là, la réaction chimique est définie comme « *... une transformation au cours de laquelle des corps purs sont consommés tandis que de nouveaux corps se forment* ». Les corps purs consommés au cours de la réaction étant « la limaille de fer » et la « fleur de soufre », il apparaît que la réaction chimique reste définie comme en classe de 4^{ème} : au niveau empirique. Une telle définition, parce que restant au niveau macroscopique, ne

peux laisser présager, chez l'apprenant, une quelconque stœchiométrie de réaction puisque ce concept se retrouve au niveau microscopique. Un réactif est défini comme « ... *un corps pur consommé au cours d'une réaction chimique* ». Le terme consommé renvoie à la combustion de la bougie qui elle consomme la paraffine et la mèche ; réaction étudiée en classe de 4^{ième}. Comme la définition de la réaction chimique, celle de réactif reste aussi au niveau macroscopique. Un produit, pour sa part, est défini comme « *un nouveau corps pur qui est formé au cours d'une réaction chimique* ». Les termes nouveaux et formé montrent que la définition de réaction chimique reste référée à la combustion de la bougie vue en classe de 4^{ième}. Nous pensons qu'une telle difficulté peut être surmontée grâce à une nouvelle définition de la réaction chimique dans la partie conservation de la matière.

2.6.3.2.2. Transposition de la loi de conservation de la matière dans le manuel de 3^{ième}

Encore appelée « loi de Lavoisier », la loi de conservation de la matière est introduite dans l'enseignement secondaire Camerounais dans le manuel de 3^{ième} afin d'informer les apprenants de l'égalité existant entre les masses totales des produits et les masses totales des réactifs. L'illustration se fait à partir de la réaction entre le fer et le soufre, où l'on montre que la somme des masses de fer et de soufre (réactifs) est égale à celle du produit sulfure de fer (produit). La loi s'énonce en ces termes : « Au cours d'une réaction chimique, la masse totale des réactifs consommés est égale à la masse totale des produits formés ». Qu'en-est-il de la conservation de la quantité des réactifs ?

Comprendre cette égalité entre la masse totale des réactifs consommés et la masse totale des produits formés marque un premier changement de registre de savoir dans l'étude de la réaction chimique. En effet, les auteurs mentionnent que : « *cette loi ne fait que traduire en termes de masse le principe de conservation des éléments qui stipule que : au cours des réactions chimiques, les atomes des différents éléments se conservent* ». Ainsi donc, le concept macroscopique de masse est perçu comme un indice, au niveau microscopique, de l'agencement d'un grand nombre d'entités infiniment petites qui constituent la matière. Les concepts de réactif et de produit sont donc appréhendés au niveau microscopique comme des édifices constitués d'atomes. Les atomes présents dans les réactifs se retrouvent tous, combinés différemment dans les produits obtenus. Ainsi, les atomes de fer (Fe) et de soufre (S) se retrouvent dans le sulfure de fer (FeS), en même nombre que dans les réactifs ». Le changement de registre observé ne semble donc pas avoir pour fin de favoriser le développement des significations que les apprenants prêtent aux concepts de réaction chimique, réactif et produit en les abordant au niveau microscopique, mais plutôt d'embrayer sur l'écriture symbolique

d'une équation bilan. De ce fait, parler de réactifs et de produits en termes d'atomes a permis de le représenter par leurs symboles chimiques (Fe, S et FeS).

2.6.3.2.3. Le symbolisme de la réaction chimique dans le manuel de 3^{ième}

Pour rendre compte de la transformation en respectant la conservation des éléments, la réaction chimique est schématisée par une équation bilan. Cette dernière est définie comme : « ... *un schéma qui établit un bilan en quantité de matière de la réaction chimique tout en respectant la conservation des éléments chimiques* ». Une telle définition masque l'aspect transformation et met plus d'emphasis sur l'aspect conservation ce qui constitue un frein à la conceptualisation de la stœchiométrie. L'aspect transformation exprimé par le concept de quantité de matière, relève plus du macroscopique pendant que l'aspect transformation, traduit par un réarrangement des atomes qui constitue les réactifs pour former les produits, relève du registre microscopique. En conclusion, dans le manuel de 3^{ième}, l'équation bilan de réaction est définie au niveau macroscopique.

Dans l'écriture de l'équation bilan en classe de 3^{ième}, les formules chimiques remplacent les noms des composés dans l'équation littérale vue en classe de 4^{ième} : « *on écrit les formules des réactifs à gauche de la flèche (donne) et celles des produits à sa droite* ». L'usage des formules des réactifs et des produits débouche sur la stœchiométrie de la réaction.

2.6.3.2.4. Transposition de la stœchiométrie dans le manuel de 3^{ième}

La figure ci-dessous représente l'activité utilisée pour introduire le processus d' « équilibrage » d'une équation bilan

Activité 2 : Utilisation de la loi de conservation des atomes des éléments pour équilibrer une équation-bilan.

Tu as réalisé en classe de 4^{ème} la combustion complète du méthane :

- Rappelle les produits de cette réaction et décris brièvement le test d'identification de chacun d'eux .
- Écris l'équation littérale résumant cette combustion.
Représente dans l'équation littérale chaque espèce chimique (réactifs et produits) par sa formule pour obtenir l'équation-bilan de la réaction ;
- Équilibre cette équation-bilan en plaçant devant la formule des réactifs et produits des coefficients appelés **coefficients stœchiométriques** afin de respecter la conservation du nombre d'atomes des différents éléments dans les réactifs et dans les produits. (Ne pas modifier la formule d'un corps pur dans cette opération).

Figure 7: Activité amorçant l'équilibrage d'une équation bilan dans le manuel Dewatek. p. 25

Cette activité prend appui sur la réaction de combustion du méthane vue en classe de 4^{ième} et exige à l'élève de se remémorer des réactifs et produits engagés. On pourrait se demander pourquoi le choix de cette équation déjà abordée en classe de 4^{ième} est-ce pour faciliter le changement de niveau de représentation chez l'apprenant ? Nous voyons, d'après cette activité, que les coefficients stœchiométriques sont ajoutés à l'équation bilan dans l'optique de respecter la conservation des éléments. Ce qui signifie se rassurer qu'il y ait le même nombre de chaque élément de part et d'autre de la flèche. Les coefficients stœchiométriques sont donc non seulement interprétés au niveau symbolique, mais semblent n'avoir aucun lien avec l'expérience. Puisque dans l'activité, on va d'une équation littérale à une équation bilan (après représentation des réactifs par leurs formules chimiques), puis on se retrouve à une équation bilan équilibrée après ajout des coefficients stœchiométriques. Les coefficients stœchiométriques ne sont pas utilisés pour appliquer la stœchiométrie, mais simplement pour équilibrer l'équation de réaction. Tout se passe donc comme si la stœchiométrie était une conséquence, un fait de hasard issu de la conservation des éléments. Comme si les réactifs se mettaient réaction en obéissant à la loi de conservation des éléments. A partir de là, on se demande comment les élèves interpréteraient la fin d'une réaction chimique. Ainsi que le sens qu'ils prêtent aux coefficients stœchiométriques.

Dans les notes de cours servant de notes de cours à l'enseignant, nous pouvons lire : « *équilibrer une équation-bilan consiste à placer devant les formules des réactifs et des produits des coefficients stœchiométriques afin d'assurer la conservation des nombres d'atomes de chaque espèce au 1^{er} membre et au 2^e membre de l'équation* ». Nous nous retrouvons dans une « *bouche symbolique* » (Dehon, 2018). Une équation bilan équilibrée traduirait la vérification de la loi de conservation de la matière en tant qu'elle est la manifestation de la conservation des éléments et non en tant qu'elle manifeste les proportions dans lesquelles les réactifs devraient réagir pour donner les produits. Cette boucle symbolique ne va pas sans créer des frustrations chez les élèves. Dumon et Laugier (2004), rapportaient les propos d'une élève au sujet de la chimie ainsi : « *la chimie, c'est trop abstrait. Ça n'a aucun sens de voir des chiffres et des lettres qui bougent* ». Jusqu'ici, la réaction chimique reste abordée sous un angle trop statique comme disaient Viovy et Caretto (1994). Cela enlève l'élève de l'enthousiasme qu'il pouvait avoir pour cette science a priori spectaculaire pour le plonger dans une juxtaposition de chiffres et de lettres auxquels ils ne prêtent sûrement aucun sens scientifique. De telles difficultés auront certainement des répercussions graves sur l'exploitation d'une équation bilan de réaction.

L'exploitation d'une équation bilan de réaction introduit une nouvelle lecture de ladite équation bilan. Les coefficients stœchiométriques ne sont plus interprétés qu'au niveau symbolique, mais aussi au niveau macroscopique comme proportionnels aux quantités de matière de réactifs consommés et des produits obtenus. On peut lire aux pages 27-28 du manuel : « *Au cours d'une réaction chimique, les quantités de matière de réactifs consommés et de produit formés sont proportionnels aux coefficients stœchiométriques de l'équation* ». Ce changement de niveau d'interprétation du coefficient stœchiométrique laisse des interrogations quant à la représentation que l'élève et pourquoi pas l'enseignant se fait de lui. Pourquoi un nombre qui plus haut a été introduit pour "équilibrer" l'équation bilan devient le facteur qui dicte les proportions de réaction ? La figure ci-dessous montre comment l'exploitation d'une équation bilan est transposée en 3^{ème}.

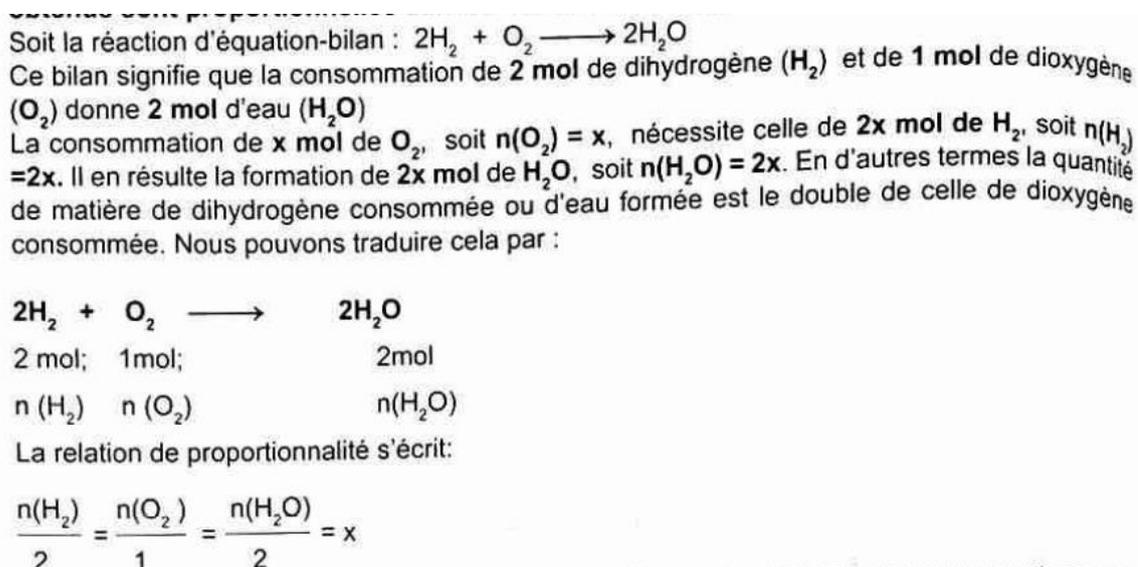


Figure 8: transposition de l'exploitation d'une équation bilan dans le manuel de 3^{ème}

La lecture de l'équation dans le registre macroscopique se poursuit avec l'introduction d'un inconnu « x » assimilable à l'avancement de réaction. Bien que le tableau d'avancement, de façon concrète ne soit pas présenté, il y a comme un besoin d'introduire, chez les élèves les méthodes de résolution algorithmique des problèmes de stœchiométrie.

Plus loin, à la page 28, on peut lire (en rapport avec l'équation d'en haut):

Si la quantité de matière de dihydrogène dans le mélange réactionnel est égale à celle de dioxygène, le dihydrogène est en défaut et limite la formation de l'eau [...] la moitié de la quantité de matière initiale de dioxygène restera dans le milieu avec l'eau à la fin de la réaction...

Cette phrase semble simple pour les auteurs. Mais ce n'est sûrement pas le cas pour les élèves. Pourquoi la quantité restante est la moitié de la quantité initiale ? Nous pensons que la réponse à cette question nécessite la prise en compte d'un nouveau niveau de formulation : le niveau microscopique. Ce qui nous fait voir que ce dernier niveau est très peu exploité dans la séquence sur la réaction chimique et nous amène à l'hypothèse selon laquelle les apprenants ont du mal à se représenter, à l'échelle microscopique, un mélange réactionnel.

La relation de proportionnalité ainsi définie permet d'introduire la notion de réactif limitant. A la page 28, il est mentionné :

D'une manière générale, si les réactifs ne sont pas dans les proportions stœchiométriques, l'un d'entre eux est défaut : c'est le réactif limitant du mélange. Il est entièrement consommé à la fin de la réaction. On a alors un des produits formés et un reste du réactif en excès.

Les seuls types de réactions étudiées à ce niveau sont les réactions totales dont la fin est marquée par l'épuisement total d'au moins un des réactifs.

2.7. Analyse de la transposition didactique du concept de stœchiométrie par les enseignants de 3^{ème} de l'enseignement secondaire général

2.7.1. Cadre d'analyse

Très peu de recherches concernant la transposition didactique sont poursuivies jusqu'à sa mise en application en situation de classe. Nous faisons l'hypothèse que la structure du cours de l'enseignant constitue l'un des facteurs majeurs qui influence la structuration de la connaissance de l'élève. En effet, chaque cours, chaque support pédagogique produit par l'enseignant est accompagné d'un commentaire oral émis par ce dernier. C'est à travers ce commentaire que les logiques disciplinaires incarnées par l'enseignant sont véhiculées. A défaut d'observer le cours dispensé par l'enseignant en situation de classe, car notre recherche intervient à une période de l'année scolaire où le cours portant sur la notion de réaction chimique a déjà été dispensé et parce que les pratiques déclarées ne sont toujours les pratiques effectives, nous avons procédé à un recueil et une analyse des notes de cours de sept enseignants de classe de 3^{ème}. Nous pensons que les activités et les exemples pourraient garder des traces des logiques disciplinaires véhiculées oralement.

2.7.2. Recueil et analyse des données

Nous avons recueilli au total sept notes de cours de sept enseignants de trois lycées de la Banlieue de Yaoundé à savoir le lycée de Ngoaekelle, le lycée général Leclerc et le lycée de Biyem-Assi.

2.7.3. Présentation des résultats et analyse

Dans ce paragraphe, nous faisons l'analyse de la « notion de réaction chimique » telle que présentée dans les notes de cours des enseignants. Cette analyse suit les quatre principaux axes retenus lors de la description du manuel officiel. En particulier un accent sera mis sur les activités et illustrations utilisées.

2.7.3.1. Identification des enseignants auteurs des cours

Nous avons analysé les notes de cours de 7 enseignants ayant au moins une ancienneté de 9 ans dans l'enseignement des PCT au secondaire.

Tableau 1: Identification des enseignants auteurs des cours analysés

Dénomination de l'enseignant	Dénomination du cours	Ancienneté
Enseignant 1	Cours 1	17 ans
Enseignant 2	Cours 2	14 ans
Enseignant 3	Cours 3	12 ans
Enseignant 4	Cours 4	10 ans
Enseignant 5	Cours 5	10 ans
Enseignant 6	Cours 6	10 ans
Enseignant 7	Cours 7	9 ans

2.7.3.2. Définition des concepts de réaction chimique, réactif et produit dans les notes de cours des enseignants de 3^{ème}

D'entrée de jeu, notons que les objectifs assignés à cette séance, lorsqu'énoncés, sont conformes aux prescriptions du programme (c'est le cas des cours 3, et 7). D'autres énoncent simplement la compétence attendue : exploiter/utiliser une équation bilan de réaction (cours 2,4 et 6). Les cours 1 et 5 ne présentent ni objectifs, ni compétences attendus.

Seuls deux cours parmi les sept que nous avons recueillis amorcent cette partie par une activité. Les autres débutent par des définitions pures et simples des concepts de réaction chimique, réactif, produit et quelques fois équation bilan. Notons que les activités utilisées dans les cours

2.7.3.3. Transposition de la loi de conservation de la matière par les enseignants de 3^{ème}

Toutes les notes de cours de notre corpus comportent la loi de conservation de la matière. Dans cette partie la loi de Lavoisier est énoncée en ces termes : « *Au cours d'une réaction chimique, la masse totale des réactifs consommés est égale à la masse totale des produits formés* ». Puis, reformulée au niveau microscopique en ces termes : « *au cours d'une réaction chimique, les atomes des différents éléments se conservent* » (cours 1, cours 3) ou « *au cours d'une réaction chimique il y a conservation des atomes* » (cours 5) ou encore « *au cours d'une réaction chimique, le nombre d'atomes des produits est égal au nombre d'atomes des réactifs* » (cours 6).

Certains enseignants, une fois la loi de Lavoisier formulée au niveau macroscopique, prennent le soin de l'illustrer en l'appliquant à une réaction particulière. Prenons l'exemple utilisé dans le cours 6.

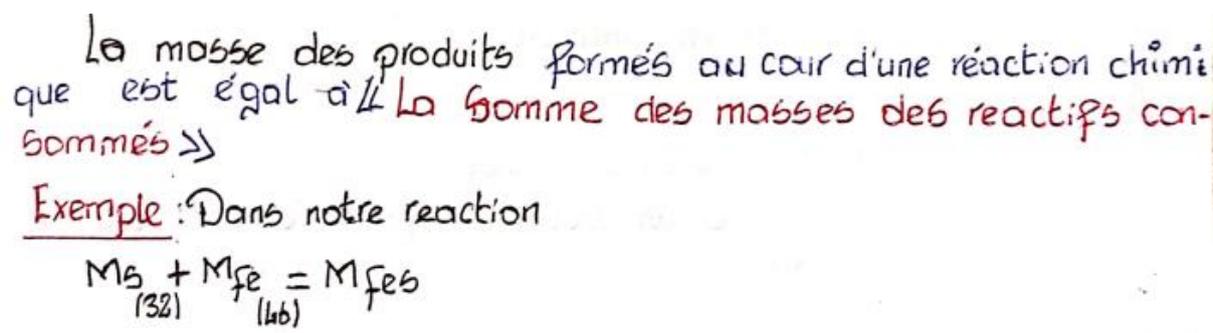


Figure 10: illustration de la loi de Lavoisier par un enseignant de 3^{ème}

Dans cet exemple, il est question de la réaction entre le fer et le soufre dont l'équation est : $Fe + S \rightarrow FeS$. Ici, c'est la somme des masses molaires des réactifs qui est égale à la masse molaire du produit. Ce qui est erroné.

Comme dans le manuel, la conservation de la quantité des réactifs n'est pas abordée par les enseignants en situation de classe.

2.7.3.4. Transposition didactique du symbolisme de la réaction chimique par les enseignants de 3^{ème}

Les enseignants ont deux principaux moyens d'amener le symbolisme de l'équation bilan : l'écriture d'une équation littérale et la loi de Lavoisier formulée au niveau microscopique. En majorité, tous commencent par définir l'équation bilan de réaction. Les définitions sont les suivantes : « *l'équation bilan est la représentation du schéma d'une réaction chimique en utilisant les formules des corps* » (cours 4) ; « *l'équation bilan l'équation bilan est le schéma*

qui met en évidence un bilan en quantité de matière de la réaction chimique tout en respectant la conservation des atomes » (cours 1, cours 2, cours 3) ; « *écriture du schéma de la réaction à l'aide des symboles des corps qui interviennent dans la réaction* » (cours 6); « *schéma qui traduit la relation de proportionnalité entre les variations de quantités de matière des différents corps purs pouvant intervenir dans la réaction* » (cours 7). Nous remarquons que certaines définitions sont purement symboliques (cours 4 et 6), d'autres, comme dans le cas du manuel, masquent l'aspect transformation en insistant sur l'aspect conservation, ce qui pourrait avoir comme effet de freiner la conceptualisation de la stœchiométrie (cours 1,2 et 3), une dernière définition se centre davantage sur la relation de proportionnalité pouvant exister entre les quantités de matière de réactifs et produits intervenant dans la réaction. (Cours 7).

Tout compte fait, dans les cours analysés, l'aspect transformation reste très peu développé au profit de l'aspect conservation. Ce qui nous laisse penser que dans les notes de cours des enseignants, tout comme dans le manuel, l'équation bilan de réaction est définie au niveau macroscopique.

2.7.3.5. Transposition de la stœchiométrie par les enseignants de 3^{ième}

Dans la plupart des cours analysés, la stœchiométrie est étroitement liée, voir confondue à l'équilibrage des équations bilan. L'équilibrage des équations bilan n'est pas amorcé par une activité, mais par l'énoncé d'une règle. On peut lire à ce sujet : « *Pour équilibrer l'équation bilan, on place devant les formules des corps des nombres entiers ou demi entiers de sorte que la conservation des atomes soit respectée. Ces nombres sont appelés coefficients stœchiométriques ; l'équation est dite équilibrée lorsque la conservation des atomes est respectée* » (cours 4). Cette règle se rapproche grandement de celle énoncée dans le manuel et renforcera donc le développement chez les élèves de significations purement symboliques à propos du concept de coefficient stœchiométrique.

Par ailleurs, quatre des sept cours de notre corpus n'abordent pas l'exploitation d'une équation bilan. Ce qui implique une non construction, par les enseignants, de la relation de proportionnalité, décrite par l'équation bilan, existant entre la quantité de matière de réactif consommé et celle de produit formé. Les élèves feront donc connaissance de cette relation dans des exercices et par conséquent en construiront non seulement des significations du niveau symbolique, mais essayerons de résoudre mécaniquement les exercices de chimie quantitative. Certains se contentent de définir la notion de mélange stœchiométrique comme : « *un mélange est dit stœchiométrique si les réactifs sont pris dans les proportions de l'équation bilan équilibrée de la réaction* » (cours 1). Du point de vue de l'élève, l'on se demande ce que signifie

« prendre les réactifs dans les proportions de l'équation bilan ». A l'exception de la définition donnée par l'enseignant 7, les autres définitions de l'équation bilan ne font pas ressortir cette idée de proportions entre réactifs et produits. De plus, ces proportions sont-elles définies en termes de masse ? De volume ? De nombre de moles ? Ou même de nombre de molécules ?

Parmi les trois enseignants qui abordent l'exploitation de l'équation bilan, deux le font à partir d'une équation générale en l'occurrence l'équation $aA + bB \longrightarrow cC + dD$ et terminent par une application à une équation bilan de réaction plus explicite. On peut lire dans le cours 5 : « Les réactifs A et B sont dans les proportions stœchiométriques lorsqu'on a $\frac{n_A}{a} = \frac{n_B}{b}$. Si $\frac{n_A}{a} \neq \frac{n_B}{b}$, le mélange de A et B n'est pas stœchiométrique. Si $\frac{n_A}{a} > \frac{n_B}{b}$, on dit que le réactif A est en excès et le réactif B est en défaut ». Les jeunes apprenants de 3^{ième} qui rencontrent déjà d'énormes problèmes en mathématiques arrivent-ils facilement à donner sens à ces relations comportant un mélange de signes mathématiques et de lettres ?

L'enseignant 7 a une approche assez particulière, comme le montre la figure ci-dessous

Volumiques				
Equation bilan	C_2H_4	$+ 3O_2$	\longrightarrow	$2CO_2 + 2H_2O$
Quantités de matière	n_1	n_2		n_3 n_4
Coefficient de matière	1	3		2 2
Relation entre les quantités de matière	$\frac{n_1}{1}$	$\frac{n_2}{3}$		$\frac{n_3}{2}$ $\frac{n_4}{2}$
Relation entre les masses	$\frac{m_1}{1 \times M_1}$	$\frac{m_2}{3 \times M_2}$		$\frac{m_3}{2 \times M_3}$ $\frac{m_4}{2 \times M_3}$
Relation entre les volumes	$\frac{V_1}{1 \times V_m}$	$\frac{V_2}{3 \times V_m}$		$\frac{V_3}{2 \times V_m}$ $\frac{V_4}{2 \times V_m}$

Figure 11 : transposition de l'exploitation d'une équation bilan par un enseignant de 3^{ième}

Premièrement, il utilise ce qui s'apparente à un tableau d'avancement de réaction, à la seule différence qu'il met en exergue les quantités de réactifs ayant réagi et non pas les quantités restante à un instant t comme à l'acoutumée. La relation entre les quantités de matière est traduite en relation entre les masses et même entre les volumes ; bien que cette dernière relation ne soit pas prescrite par les programmes de la classe de 3^{ième}. Mentionnons qu'un « *nota bene* »

est donné aux élèves à la suite de ce tableau, leur donnant la condition pour qu'éthane et dioxygène soient dans les proportions stœchiométriques ainsi que les conditions pour que l'un des réactifs soit en excès.

A la question de savoir si ces approches sont suffisamment pertinentes pour construire des significations pertinentes des concepts de réactif limitant, en excès, proportions stœchiométrique, ou même de coefficient stœchiométrique, nous répondons très peu. En effet, nous pensons qu'à l'issue d'un tel enseignement, un élève sera difficilement capable de donner une définition conceptuelle de chacun des termes précités, mais aussi de faire un lien direct entre ces concepts et l'expérience. Un élève comprend-il que le terme « limitant » utilisé est lié à la fin de la réaction ? Puisque les conditions d'arrêt d'une réaction chimique ne sont pas évoquées ? Un élève comprend-il la nécessité de parler de proportions stœchiométriques ?

En conclusion, la transposition didactique du concept de stœchiométrie par les enseignants en classe de 3^{ème} semble peu adaptée à la construction, par les apprenants, de significations pertinentes des concepts du réseau conceptuel de la stœchiométrie.

Partie 2 : Cadre méthodologique et opératoire

Chapitre 4 : Méthodologie de l'étude

Le présent chapitre introduit la partie expérimentale de notre recherche. Il présente la nature de l'approche méthodologique utilisée dans la présente étude, donne des indications sur la constitution de notre échantillon ainsi que les principaux outils et techniques de collecte et d'analyse des données

4.1. Type de recherche et échantillon

En nous intéressant aux conceptions des élèves sur le concept de stœchiométrie, nous essayons de trouver des explications au problème des difficultés des élèves en fin de secondaire et même à l'université à résoudre des problèmes de stœchiométrie. C'est pourquoi nous qualifierons notre recherche de recherche descriptive (Thouin, 2014).

Notre population est constituée des apprenants de 13 à 19 ans ayant reçu un enseignement sur la « notion de réaction chimique » (telle que formulée dans le programme officiel de la classe de 3^{ième}) en classe de 3^{ième}. Nous souhaitons identifier les différentes significations que ces derniers prêtent aux différents concepts du réseau conceptuel de la stœchiométrie. Compte tenu du fait que notre étude intervient en fin d'année scolaire 2022/2023 (au moment où les programmes sont presque achevés) d'une part et qu'elle vise à suivre l'évolution des significations que les apprenants prêtent au cours de leur cursus aux concepts du réseau conceptuel de la stœchiométrie d'autre part, elle concerne :

- Les élèves des classes de 3^{ième} de l'enseignement secondaire général (élèves de 13-15 ans) qui sont à la phase de préparation intensive aux épreuves de BEPC session 2023. Parceque se trouvant dans le niveau de construction de la stœchiométrie, ils constituent l'échantillon le plus représentatif ;
- Les élèves des classes de 2^{nde} C et E (élèves de 14-16 ans) de l'enseignement secondaire Camerounais. Ils sont tous passés par la classe de 3^{ième}, ont abordé un peu plus en profondeur que leurs cadets la structure de l'atome et la formation des liaisons chimiques, sont familiarisés à la chimie des solutions aqueuses et ont donc régulièrement exploité les équations de mise en solution pour déterminer les concentrations d'ions en solution. Forts de tout cela, ces apprenants devraient, mieux que ceux de 3^{ième}, se représenter la réaction chimique au niveau microscopique et exploiter les équations bilan de réactions ;
- Les élèves de 1^{ière} C et D de l'enseignement secondaire général Camerounais (élèves de 15-17 ans) qui sont en phase de préparation intensive des épreuves du probatoire scientifique session 2023. Ils ont étudié au courant de l'année les cas spécifiques de réactions d'oxydoréduction en plus des réactions d'addition et de substitution de chimie organique. De ce fait, ils sont eux aussi assez outillés pour une meilleure maitrise des concepts du réseau conceptuel de la stœchiométrie.
- Les élèves des classes de Tle C et D de l'enseignement secondaire général Camerounais (élèves de 16-19 ans) en phase de préparation intensive des épreuves du baccalauréat

scientifique session 2023. Ils ont, dans leur cursus, abordé la notion de cinétique chimique ce qui devrait leur permettre d'approfondir leur représentation de la réaction chimique au niveau microscopique, mais mieux solidifier chez eux l'idée de réaction chimique comme un processus continu. Aussi, ils ont étudié les réactions acido-basiques et les cas de réactions des acides et bases faibles dans avec l'eau. La résolution de problèmes relatifs à ces derniers cas, nécessite une maîtrise de l'équation de conservation de la matière. Pour cela, les apprenants de ce niveau devraient avoir une très grande maîtrise des concepts du réseau conceptuel de la stœchiométrie.

Les questionnaires ont été distribués à 135 élèves de 3 classes de 3^{ième} du lycée de Ngoakelle, lycée de la Banlieue de Yaoundé, région du centre Cameroun. Pour ce qui est des classes de 2^{nde}, ce sont 40 élèves de 3 établissements de la Banlieue de Bafoussam, région de l'Ouest Cameroun à savoir : le lycée Bilingue de Bafoussam, le Lycée technique de Bafoussam et le collège « colibri » de Bafoussam. Pour ceux de la classe de 1^{ière}, il s'agit de 58 élèves des lycées de Ngoakelle et général Leclerc de Yaoundé et ceux de Tle, 38 élèves des mêmes lycées. Par ailleurs sur les 135 questionnaires distribués en classe de 3^{ième}, 30 ont été rejetés parce que n'ayant pas été remplis adéquatement (un taux de non réponses supérieur à 46%). L'échantillon final est ainsi composé de 239 élèves couvrant les classes de 3^{ième} en Tle et répartis ainsi : 105 élèves de 3^{ième}, 40 de 2^{nde}, 56 de 1^{ière} et 38 de Tle. Mentionnons que les établissements sélectionnés sont considérés comme représentatifs de la diversité des établissements d'enseignement secondaire général au Cameroun.

4.2. Technique de collecte des données

Les significations que les apprenants prêtent aux concepts du réseau conceptuel de la stœchiométrie ont été recueillies au moyen d'un questionnaire. Il leur a été adressé un questionnaire conçu sous forme de tests papier-crayon auxquels ils devaient répondre en justifiant leurs réponses respectives. Il s'agit d'un outil d'évaluation dont les questions sont lues par les apprenants et auxquelles ils répondent par écrit.

4.2.1. Elaboration et validation du questionnaire

Le questionnaire a été élaboré sous forme d'activités. Les questions ont été formulées en lien avec notre objet d'étude et en rapport avec le contexte Camerounais. Le questionnaire ainsi conçu comporte 9 activités et un total de 13 items ouverts ou semi-ouverts portant sur les significations des concepts du réseau conceptuel de la stœchiométrie. Avant sa diffusion auprès de notre échantillon, le test a d'abord été validé auprès d'un total de 22 apprenants des classes

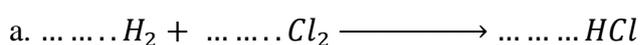
de 3^{ème}, 3 élèves de la classe de 1^{ère} et 10 élèves de la classe de Tle qui ne participent pas à l'enquête. Cette étape a révélé la nécessité de réajuster certaines consignes et de modifier certaines propositions dans le cas des items à choix multiples. Une révision du test a donc été faite après la validation pour donner lieu au test final soumis aux élèves des classes sus mentionnées. La passation du test ne fut pas simultanée. Chaque classe a eu sa période de travail. Toutefois, la durée dans les différentes classes est restée de 45 minutes en moyenne.

4.2.2. Présentation du test et analyse a priori

4.2.2.1. Analyse de l'activité 1

Activité 1 : Equilibrage des équations bilan de réaction

Q1 : Equilibrer chacune des équations suivantes :



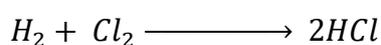
Objectif :

Cette activité vise à vérifier l'aptitude des élèves à équilibrer les équations bilan réactions.

Nous avons choisi deux cas. Un premier cas que nous qualifions de « classique » ou « contrat » puisque la mise en application des règles d' « équilibrage » des équations ne sera pas très difficile. La deuxième équation (deuxième cas) met en jeu des atomes non impliqués dans les molécules tant du côté des réactifs que de celui des produits. Pour cela, le processus d' « équilibrage » de l'équation demandera des acrobaties mathématiques auxquelles tous les élèves ne peuvent pas s'adonner avec succès. La première question réduit donc considérablement le risque d'incidence de l'obstacle mathématique, mais n'exclut pas les bonnes réponses hasardeuses.

Réponse possible à partir du savoir savant :

Equilibrer les équations bilan se réduira à appliquer la règle de conservation des éléments. Partant du savoir savant, on s'attend aux réponses suivantes :



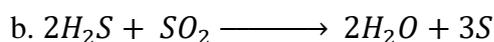
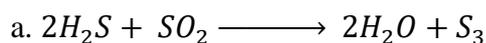
Réponse possible à partir de la transposition didactique :

L'analyse de la transposition didactique de la notion de réaction chimique en classe de 3^{ième} faite dans les chapitres précédents montre qu'un accent particulier est mis sur la conservation des éléments dans l'enseignement de la réaction chimique. Ainsi, nous nous attendons à ce que les élèves de toutes les classes confondues équilibrent correctement les équations (l'équation a. a fortiori) qui leur sont proposées. Une difficulté mathématique se fera certainement ressentir dans le cas de l'équation b.

4.2.2.2. Analyse de l'activité 2

Activité 2 : Composition constante des composés

Q.2. Le sulfure d'hydrogène (H₂S) réagit avec le dioxyde de soufre (SO₂) pour former l'eau (H₂O) et le soufre (S). L'équation bilan équilibrée de la réaction qui se produit est la suivante : (entourer la lettre correspondant à la proposition exacte)



e. Autre

Justifie ton choix.

Objectif :

Cette seconde activité a pour objectif de vérifier l'assimilation par les élèves du caractère constant de la composition des composés chimiques ce qui interdit la modification des indices des composés dans le but d'équilibrer une équation bilan.

L'équation que nous avons choisie est tirée du livre au programme de la classe de 3^{ième} et est par conséquent au niveau de tous les apprenants sondés.

Pour une meilleure interprétation des résultats, nous avons choisi de construire cet item sous la forme de QCM pour ensuite laisser le soin à l'apprenant de justifier son choix.

L'équation a. est une équation bilan de réaction équilibrée, mais ne contient pas toujours les composés énoncés dans le libellé. La proposition b correspond effectivement à l'équation bilan équilibrée de la réaction. La proposition c, tout comme la proposition a est une équation équilibrée, qui elle ne comporte pas toujours les composés de l'énoncé. La proposition d pour sa part est une traduction pure et simple du libellé. Elle correspond à une équation non équilibrée. Les élèves qui y jetteront leur dévolu sur les propositions a et c auront donc, au nom de la conservation absolue des éléments dans une équation bilan, enfreint la loi de composition constante des composés (la justification mettra en lumière cette pseudo hypothèse). La proposition e. nous évite d'embarrasser un élève qui ne trouverait pas son compte dans les propositions sus faites.

Réponse attendue à partir du savoir savant:

Partant du savoir savant, la bonne réponse est celle qui conserve tant l'identité des produits donnée dans le libellé que les éléments chimiques c'est-à-dire la proposition d :



Réponse attendue à partir de la transposition didactique :

Comme mentionné dans les précédents chapitres, la transposition didactique met, depuis la classe de 3^{ième}, un très grand accent sur la conservation des éléments au détriment de la constance de composition des composés. De ce fait, nous nous attendons à ce que les propositions a. b et c. soient les plus fréquentes puisqu'elles respectent toutes la conservation des éléments. Seulement, la proposition b. pourrait ne pas avoir le maximum de suffrages.

4.2.2.3. Analyse de l'activité 3

Activité 3 : Signification du coefficient stœchiométrique

Q.3. On fait réagir trois mol de diazote (N₂) et deux mol de dihydrogène (H₂) pour former de l'ammoniac (NH₃). Ecrire l'équation bilan de la réaction de formation de l'ammoniac.

Objectif :

Cette activité a un double objectif : vérifier la capacité des élèves à écrire une équation bilan de réaction à partir d'un bref « récit » d'une expérience. Plus précisément, elle examine l'aptitude des élèves à passer du niveau macroscopique au niveau symbolique au sens de (Gilbert &

Treagust, 2009). De plus, elle sonde les significations attribuées au coefficient stœchiométrique, notamment son assimilation à la quantité initiale des réactifs introduits. Nous avons choisi les quantités 2 et 3 parce qu'elles sont différentes des coefficients stœchiométriques de l'équation bilan. Ainsi, il sera plus facile de détecter la conception mentionnée précédemment.

Réponse attendue à partir du savoir savant :

L'équation bilan d'une réaction est indépendante des quantités initiales de réactifs. La bonne réponse est donc : $N_2 + 3H_2 \longrightarrow 2NH_3$

Réponse attendue à partir de la transposition didactique

La transposition didactique présente le coefficient stœchiométrique comme servant à équilibrer une équation bilan. Les élèves cependant l'assimilent à la quantité de réactif introduite et même à la quantité de produit formée (nous nous référons à nos constats empiriques sur le terrain). Ainsi, nous nous attendons à ce que cette confusion se fasse sentir, mais aussi que certains élèves écrivent la bonne équation. Cependant, des élèves pourraient aussi écrire une équation contenant des réactifs et/ou des produits non mentionnés dans le libellé.

4.2.2.4. Analyse de l'activité 4

Activité 4 : conservation des éléments chimiques au cours d'une réaction chimique

Q.4. La combustion d'un corps A dans le dioxygène (O₂) de l'air produit le dioxyde de carbone (CO₂) et de l'eau (H₂O). D'où proviennent les éléments carbone et hydrogène présents dans les produits ?

Objectif

Cet item évalue la compréhension par les élèves de la conservation des éléments chimiques au cours d'une réaction chimique.

Réponse attendue à partir du savoir savant

La réaction chimique est marquée par le réarrangement des atomes des réactifs pour former les produits. De ce fait, les éléments chimiques présents dans les produits sont les mêmes que ceux présents dans les réactifs. Dans notre cas précis, les éléments carbone et hydrogène proviennent du corps A puisque la molécule de dioxygène n'est constituée que d'atome d'oxygène.

Réponse attendue à partir de la transposition didactique

Nous nous attendons à ce que les élèves, pour la majorité restent dans une boucle langagière (Dehon, 2018) en faisant des propositions telles que ces éléments proviennent de la combustion du corps A, de la réaction avec le dioxygène, ...

4.2.2.5. Analyse de l'activité 5

Activité 5 : Mélange stœchiométrique et détermination de la quantité de matière de produit formé connaissant la quantité de matière initiale d'un réactif

Q.5. Quelle est la quantité de matière de dioxygène (O₂) nécessaire pour faire réagir complètement 2 mol de fer ?

Objectif de l'activité 5

L'équation choisie se retrouve à équilibrer dans la section « vérification des acquis » du manuel de la classe de 3^{ième}. Nous l'avons choisie parce qu'elle comporte des coefficients stœchiométriques tous différents de l'unité ce qui permettra de mieux apprécier la maîtrise des règles de stœchiométrie.

Cette activité a un triple objectif ce qui justifie son sciage en 3 items. Elle évalue, premièrement, la compréhension de l'expression « mélange stœchiométrique » par les élèves tant au niveau macroscopique que microscopique et ensuite leur aptitude à déterminer, la quantité de matière de produit formé connaissant la quantité de matière de réactif consommée. L'activité est fondée sur l'équation bilan de la réaction de formation de la rouille : $4Fe + 3O_2 \longrightarrow 2Fe_2O_3$.

Objectif de la question 5

Sonder les significations associées à l'expression « mélange stœchiométrique », au niveau macroscopique, par les élèves.

Réponse attendue à partir du savoir savant

Les réactifs sont dans les proportions stœchiométriques lorsque les coefficients de proportionnalité de leurs quantités initiales par rapport à leurs coefficients stœchiométriques respectifs sont égaux. Ainsi, les deux réactifs sont dans les proportions stœchiométriques si :

$$\frac{n_{O_2})_{initiale}}{3} = \frac{n_{Fe})_{initiale}}{4} \text{ i. e } n_{O_2} = \frac{3}{4} n_{Fe})_{initiale} \text{ soit } n_{O_2} = 1,5 \text{ mol}$$

Réponse attendue à partir de la transposition didactique

L'analyse des notes de cours des élèves de la classe de 3^{ième} portant sur la « notion de réaction chimique » montre que plusieurs enseignants n'abordent pas l'exploitation d'une équation bilan avec les élèves. A partir de la classe de seconde, la chimie quantitative occupe un volume assez important du programme de chimie demandant ainsi aux apprenants de développer, même mécaniquement, des techniques d'exploitation d'une équation bilan de réaction. De ce fait, nous nous attendons à un taux élevé de non réponse et même de mauvaises réponses à cette question en classe de 3^{ième}, qui ira décroissant de la 2^{nde} en Tle.

Q.6. Quel est le nombre de molécules de dioxygène (O_2) nécessaire pour la réaction totale avec 8 atomes de fer ?

Objectif

Sonder les significations associées à l'expression « mélange stœchiométrique », au niveau microscopique, par les élèves.

Réponse attendue à partir du savoir savant

La mole est l'unité de décompte des entités chimique à grande échelle. De ce fait, les considérations faites pour l'item précédent restent valables lorsqu'on passe au niveau microscopique (petite échelle). En clair, il faut 6 molécules de dioxygène pour la réaction avec huit atomes de fer.

Réponse attendue à partir de la transposition didactique

Comme dans le cas de l'item précédent, nous attendons un taux de non réponse assez élevé en classe de 3^{ième}. Des considérations au niveau symbolique pourront cependant permettre aux élèves d'aboutir à la bonne réponse.

Q.7. Quelle est la quantité de matière d'oxyde de fer III (Fe_2O_3) formée à partir de deux mol de fer (Fe) ?

Objectif

Evaluer l'aptitude des élèves à déterminer la quantité de matière de produit formée connaissant la quantité de matière d'un réactif ayant réagi.

Réponse attendue à partir du savoir savant

La réaction étant totale, le quart de la quantité de matière initiale de fer (qui réagit totalement) vaut la moitié de la quantité de d'oxyde de fer (III). Ainsi, il se forme 1 mol d'oxyde de fer (III).

Réponse attendue à partir de la transposition didactique

Comme nous l'avons mentionné dans les chapitres introductifs, cette tâche est l'une des plus assignées aux élèves dans les problèmes quantitatifs de chimie. Nous estimons donc que les élèves y sont familiers. Nous nous attendons donc à ce que les élèves écrivent au moins correctement la relation mole à mole entre le fer et l'oxyde fer (III). Les plus grands pourcentages de bonnes réponses pourraient se retrouver dans les classes de 1^{ière} et de Tle.

4.2.2.6. Analyse de l'activité 6

Activité 6 : signification du coefficient stœchiométrique et détermination de la quantité de matière d'un produit à partir d'un mélange non stœchiométrique

Q.8. Le chiffre 4 placé devant le symbole « Fe » représente : **(entoure la lettre correspondant à la proposition exacte)**

- a. La quantité de matière de fer (Fe) à l'état initial
- b. Le nombre d'atomes de fer (Fe) à l'état initial
- c. Le nombre de fer (Fe)
- d. La quantité de matière de fer (Fe) nécessaire pour réagir complètement avec 3 mol de dioxygène (O₂)
- e. Autre

Cette activité est basée sur la même réaction que l'activité précédente, mais présente des finalités bien différentes. Elle aussi, regroupe plusieurs items et sonde les significations associées au coefficient stœchiométrique ainsi que la détermination de la quantité de matière d'un produit à partir d'un mélange non stœchiométrique aux niveaux macroscopique et microscopique.

Objectif de la question 8

Sonder les significations associées, par les élèves, au coefficient stœchiométrique. Pour atteindre ce but, nous avons choisi de présenter l'item sous forme de QCM. Chaque proposition est tirée de conceptions relevée dans la littérature.

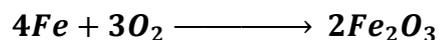
Réponse attendue à partir du savoir savant

b et d, correspondant respectivement aux niveaux microscopique et macroscopique.

Réponse possible à partir de la transposition didactique

Le coefficient stœchiométrique est présenté, dès la classe de 3^{ième} comme un nombre placé devant les formules des réactifs et des produits afin d'équilibrer l'équation bilan de réaction (niveau symbolique) et assimilé par les élèves à la quantité de matière initiale de réactif par exemple. Nous nous attendons donc à un grand nombre de significations au niveau symboliques. Nous n'oublions tout de même pas qu'à cause de la nature de notre item (item à choix multiple) certains élèves pourront opter pour les propositions b et d sans pouvoir clairement le justifier.

On mélange 5 mol de dioxygène (O₂) et 3 mol de fer (Fe). La réaction qui se produit est modélisée par l'équation bilan suivante :



Q.9. La quantité de matière d'oxyde de fer III (Fe₂O₃) qui se forme à la fin de la réaction est : (entoure la lettre correspondant à la proposition exacte)

- a. 3 mol
- b. 2 mol
- c. 1, 5 mol
- d. 3,33 mol
- e. Autre

Objectif

Cet item sonde la capacité des élèves à déterminer la quantité de matière de produit formée à partir d'un mélange non stœchiométrique. En particulier, nous tenons à vérifier si les élèves, face aux quantités de matière initiales de deux réactifs, prennent la peine de trouver le réactif limitant avant de rechercher la quantité de matière de produit formée. Ceci permettrait de

vérifier s'ils ont acquis qu'une réaction totale prend fin à l'épuisement total du réactif limitant et par ricochet s'ils ont construit des significations pertinentes de la notion de réactif limitant.

Réponse attendue à partir du savoir savant :

- Détermination du réactif limitant :

Le réactif limitant est celui dont le rapport quantité de matière initiale sur coefficient stœchiométrique est le plus petit. En effet, la réaction se déroule suivant les proportions de l'équation bilan. On peut par-là considérer, au niveau macroscopique, que la quantité de matière initiale d'un réactif est proportionnelle à son coefficient stœchiométrique. Dans une réaction engageant deux réactifs, le réactif limitant est celui ayant le coefficient de proportionnalité le plus petit.

$$\frac{n_{Fe})_{initiale}}{4} = \frac{3}{4} = 0,75 \text{ mol} ; \frac{n_{O_2})_{initiale}}{3} = \frac{5}{3} \approx 1,67 \text{ mol}$$

Le fer est donc réactif limitant.

- Calcul de la quantité de matière formée

$$\frac{n_{Fe})_{initiale}}{4} = \frac{n_{Fe_2O_3})_{formé}}{2} \Rightarrow n_{Fe_2O_3})_{formé} = 2 \times \frac{n_{Fe})_{initiale}}{4} = 1,5 \text{ mol}$$

La proposition correcte est donc la proposition C.

Réponse attendue à partir de la transposition didactique

Comme dans le cas de la question 5, nous nous attendons à un taux assez élevé de non-réponses en classe de 3^{ème}. De plus, nous pensons que les élèves aptes à déterminer la quantité de matière

~~de produit connaissant la quantité de matière d'un réactif ayant réagi ne penseront pas~~

Q.10. Le nombre de molécules d'oxyde de fer III (Fe_2O_3) formé est : (entoure la lettre correspondant à la proposition exacte)

- a. 3 molécules
- b. 2 molécules
- c. 1,5 molécules
- d. $1,91 \times 10^{23}$ molécules
- e. Autre

Justifie ton choix

Objectif

Cet item a pour but de vérifier l'aptitude des élèves à déterminer le nombre de molécules de produit formé à partir d'un mélange non stœchiométrique. Cette question est donc une reformulation de la précédente au niveau microscopique.

Réponse attendue à partir du savoir savant

Le concept de mole permet de circuler entre les niveaux macroscopique et microscopique ceci en organisant les particules microscopiques en paquets de N_A (nombre d'Avogadro). La quantité de matière représente donc le coefficient de proportionnalité entre le nombre d'atomes (respectivement de molécules) et le nombre d'Avogadro. Le nombre de molécules d'oxyde de fer (II) formé est donc $1,5 \times 6,02 \cdot 10^{23} = 9,03 \cdot 10^{23}$ molécules. Soit la proposition autre.

Réponse attendue à partir de la transposition didactique

Le nombre d'Avogadro est abordé dès la classe de 3^{ième}. Les élèves en ont donc déjà entendu parler, bien que ce ne soit pas dans le cadre de l'exploitation d'une équation bilan. Puisque cet item semble lié au précédent, une quantité de matière fautive entraînera un nombre de molécules faux. Nous nous attendons aussi à ce que bon nombre considère le coefficient stœchiométrique comme étant le nombre de molécules formées.

4.2.2.7. Analyse de l'activité 7

Activité 7 : loi de conservation de la matière

Q.11. Considérons la réaction chimique symbolisée par l'équation bilan suivante :



On mélange à l'instant initial 2 mol de soufre (S) et 1 mol de dioxygène (O_2). Quelle est la quantité de matière de dioxygène (O_2) restant lorsque 0,25 mol de trioxyde de soufre (SO_3) est formé ?

Objectif

Vérifier l'aptitude des élèves à appliquer la loi de conservation de la matière. Nous avons choisi une équation à coefficients stœchiométriques différents de l'unité pour nous assurer que les élèves prennent ou non en compte le coefficient stœchiométrique lors du calcul de la quantité de matière de réactif ayant réagi.

Réponse attendue à partir du savoir savant

La loi de conservation de la matière appliquée à un réactif stipule que la quantité de matière initiale de ce réactif vaut la somme des quantités de matière de ce réactif ayant réagi et restant.

$$\text{Soit } n_{O_2)_{initiale}} = n_{O_2)_{réagi}} + n_{O_2)_{restant}} \text{ or } n_{O_2)_{réagi}} = \frac{3}{2} n_{SO_3)_{formé}}$$

$$\Rightarrow n_{O_2)_{restant}} = n_{O_2)_{initiale}} - \frac{3}{2} n_{SO_3)_{formé}} \text{ soit } n_{O_2)_{restant}} = 1 - \frac{3}{2}(0,25) = 0,625 \text{ mol}$$

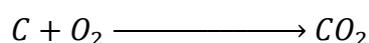
Réponse attendue à partir de la transposition didactique

Comme mentionné dans le chapitre 3 dédié à l'étude de la transposition didactique de la stœchiométrie en classe de 3^{ième} dans l'enseignement secondaire général Camerounais, la loi de conservation de la matière est enseignée dans ladite classe en termes de conservation de la masse des réactifs et des produits. Nous nous attendons donc à un taux élevé de non-réponses si non de réponses fausses dans cette classe et même en classe de 2^{nde}. Dès la première, la résolution de certains problèmes d'oxydoréduction demande de faire appel à cette loi. En Tle, l'utilisation continue avec les problèmes acido basiques. De ce fait, nous nous attendons à un taux de non réponses dans les cas des classes de 1^{ère} et Tle moins élevée que dans les deux autres classes, mais que les élèves s'arrêtent au calcul de la quantité de matière ayant réagi, l'assimilant à la quantité restante.

2.4.2.8. Analyse de l'activité 8

Activité 8 : Unité de décompte des particules mises en jeu au cours d'une réaction chimique

Q.12. Considérons la réaction chimique symbolisée par l'équation bilan suivante :



A l'instant initial, on mélange un gramme de carbone (C) et un gramme de dioxygène (O₂).

Les réactifs sont-ils dans les proportions stœchiométriques ? Justifie ta réponse

Objectif

Vérifier que les apprenants ont acquis que l'unité de décompte des particules à l'échelle macroscopique est la quantité de matière et non pas la masse ou même le volume. C'est pourquoi, nous avons choisi une équation bilan à coefficients stœchiométriques unitaires et proposé des masses initiales égales.

Réponse attendue à partir du savoir savant

Les réactifs sont dans les proportions stœchiométriques si leurs rapports ou facteurs stœchiométriques (rapport quantité de matière initiale sur coefficient stœchiométriques) sont égaux. Les masses étant égales, les quantités de matière ne pourraient l'être compte tenu de la différence des masses molaires. En conclusion, les réactifs ne sont pas dans les stœchiométriques.

Réponse attendue à partir de la transposition didactique

Certes explicitée dans le manuel officiel de la classe de 3^{ième}, la notion de proportions stœchiométriques n'est pas toujours construite en situation de classe. L'analyse de la transposition chimique de la notion de réaction chimique effectuée par les enseignants de la classe de 3^{ième} en témoigne à suffisance. Nous nous attendons, en classes de 3^{ième} et 2^{nde} à un taux élevé de non réponse. En classe de 1^{ière} et de Tle, nous nous attendons à une proportion élevée de significations non pertinentes.

2.42.9. Analyse de l'activité 9

Activité 9 : niveau de représentation de la réaction chimique chez les apprenants

Q.13. Comment expliques-tu la formation des produits à la suite d'une réaction chimique ?

Objectif

Cet item vise à vérifier le niveau de représentation de la réaction chimique chez les apprenants de la classe de 3^{ième}

Réponse possible à partir du savoir savant

A partir du savoir savant, la réponse à cette question peut se trouver dans l'un des niveaux de formulation de la réaction chimique déduits par (Dumon & Laugier, 2004) (voir chapitre 2).

Réponse possible à partir de la transposition didactique

A partir de la classe de 3^{ème} et jusqu'en classe de Tle, la réaction chimique est formulée à deux niveaux : le niveau macroscopique et le niveau atomico-moléculaire (Dumon & Laugier, 2004) le premier étant le plus privilégié. De ce fait, nous nous attendons, en faibles proportions à des réponses issues de ces deux niveaux de formulation, mais majoritairement aux formulations du niveau symbolique.

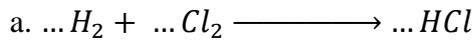
CHAPITRE 5 : PRESENTATION ET ANALYSE DES RESULTATS

Le présent chapitre présente l'étude consacrée aux élèves et vise l'identification des conceptions des apprenants sur les concepts du réseau conceptuel de la stœchiométrie, plus précisément l'identification des niveaux dans lesquels se retrouvent les significations qu'ils prêtent auxdits concepts. Les productions des élèves seront interprétées sur la base de la théorie des niveaux de signification de Dehon (2018). L'ossature de ce chapitre comprend primo la présentation et l'analyse des résultats, secundo la discussion sur les résultats obtenus, tertio des recommandations.

5.1. Résultats et analyse

5.1.1. Equilibrage des équations bilan de réaction

Q.1. Equilibrer les équations bilan suivantes



Nous avons regroupé, dans deux tableaux, les réponses des élèves à cette question ; chaque tableau correspondant à l'un des cas a ou b.

Pour le premier cas, les réponses des élèves ont été classées en six catégories. La catégorie « coefficients simples » regroupe ceux qui ont utilisé les coefficients entiers les plus simples à savoir le triplet (1, 1 et 2) (respectivement de la gauche vers la droite) pour équilibrer l'équation. La catégorie « coefficients multiples » quant à elle renferme les élèves qui ont utilisé les multiples des coefficients précédents pour le même but. La catégorie « non maîtrise de la règle » concerne ceux qui semblaient mettre des chiffres au hasard et qui finalement n'ajustaient pas l'équation. Une catégorie d'apprenants utilise des coefficients stœchiométriques rationnels pour équilibrer l'équation. Enfin, des élèves se sont retrouvés à ignorer les indices des éléments hydrogène et chlore respectivement dans le dihydrogène et le dichlore. Ceux-là sont rangés dans la catégorie « non prise en compte de l'indice »

Dans le deuxième cas, nous avons les mêmes catégories que précédemment (à l'exception de la dernière) auxquelles s'ajoutent le nombre d'éléments conservé parmi les 3 engagés dans l'équation.

Tableau 2: fréquences des différentes catégories de réponses des élèves à la première question cas a

Enoncé de la catégorie	Fréquences				Total général
	3 ^{ième}	2 ^{nde}	1 ^{ière}	Tle	
coefficients multiples	16,19%	25,00%	39,29%	13,16%	22,59%
coefficients simples	52,38%	50,00%	50,00%	76,32%	55,23%
Usage de fractions	0,00%	7,50%	1,79%	7,89%	2,93%
non maîtrise de la règle	17,14%	10,00%	7,14%	2,63%	11,30%
Non prise en compte de l'indice	10,48%	2,50%	1,79%	0,00%	5,44%
ajout de charges	0,95%	0,00%	0,00%	0,00%	0,42%
pas de réponse	2,86%	5,00%	0,00%	0,00%	2,09%
Total général	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%

Tableau 3: Fréquences des différentes catégories de réponse des élèves à la première question cas b

Enoncé de la catégorie	Fréquences				Total général
	3 ^{ième}	2 ^{nde}	1 ^{ière}	Tle	
coefficients entiers	47,62%	55,00%	76,79%	68,42%	59,00%
coefficients multiples	0,00%	0,00%	1,79%	2,63%	0,84%
usage de fractions	1,90%	15,00%	5,36%	7,89%	5,86%
non maîtrise de la règle	16,19%	7,50%	1,79%	0,00%	8,79%
un élément conservé	20,95%	12,50%	1,79%	5,26%	12,55%
2 éléments conservés	9,52%	7,50%	10,71%	15,79%	10,46%
ajout de charges	0,95%	0,00%	0,00%	0,00%	0,42%
pas de réponse	2,86%	2,50%	1,79%	0,00%	2,09%
Total général	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%

Le tableau 2 nous montre que le taux de bonnes réponses (trois premières catégories) au premier cas est de 68,56% en classe de 3^{ième}, 82,50% en classe de 2^{nde}, 91,08% en classe de 1^{ière} et 97,37% en classe de Tle. Ces pourcentages passent respectivement à 49,52%, 70,00%, 83,94% et 78,94% pour le deuxième cas. A tous les niveaux, équilibrer une équation bilan de réaction ne semble pas être une tâche bien difficile à effectuer.

Pour la première question, on observe une croissance du taux de bonnes réponses de 3^{ième} en Tle. Ce qui laisse croire qu'à mesure que les élèves avancent dans leur cursus secondaire, ils deviennent aptes à équilibrer les équations bilan de réaction. Trois faits attirent cependant notre attention.

Premièrement, 22,59 % des élèves toutes classes confondues utilisent des coefficients multiples du triplet (1, 1,2) présenté plus haut pour équilibrer l'équation. Ce raisonnement se manifestant dans toutes les classes montre que le problème est réel. Une limitation des élèves au triplet (2, 2,4) pour équilibrer ladite équation aurait laissé entendre qu'ils aient juste voulu remplir les pointillés placés devant les formules du dichlore et du dihydrogène. Mais, nous rencontrons, dans toutes les classes des élèves qui utilisent le triplet (3, 3,6) pour équilibrer l'équation. Il faut donc croire que, pour ces élèves, le plus important est d'ajuster l'équation quelque soient les « nombres »¹⁷ à utiliser. Il s'agit d'un problème de transposition didactique. Le sens des coefficients stœchiométriques comme « proportions » est donc ignoré par les élèves au profit de son utilisation au niveau symbolique pour « équilibrer l'équation de réaction », comme l'avaient montré Dehon & Snauwaert (2015).

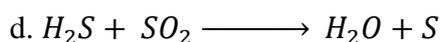
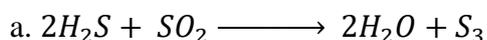
En outre, 5,44% des élèves testés, n'ont pas pris les indices en compte au moment d'équilibrer l'équation. Cette remarque, apparaissant dans toutes les classes à l'exception de la Tle, fait montre de la réalité du problème. Il semblerait que lorsque des corps purs simples de même valence réagissent pour former un seul produit, les élèves font abstraction de leurs indices en équilibrant l'équation bilan.

Curieusement, pour la deuxième équation bilan, le plus grand taux de bonnes réponses est enregistré en classe de 1^{ière}. S'il est vrai, comme mentionné plus haut que les élèves semblent avoir une facilité à équilibrer les équation bilan de réaction, il est tout de même important de préciser que, lorsque l'équation devient un peu 'complexe', la difficulté mathématique et certainement les problèmes de concentration des élèves font baisser le taux de bonnes réponses. C'est pourquoi nous nous sommes intéressé, dans le cas des équations mal équilibrées, au nombre d'éléments conservés. Si en classes de 3^{ième} et de 2^{nde} les élèves parviennent majoritairement à conserver un élément, en 1^{ière} et en Tle, ils vont jusqu'à deux ce qui n'est pas étonnant vu le nombre d'équation bilan qu'il leur a été demandé d'équilibré depuis leur entrée au lycée.

¹⁷ Synonyme de coefficient

5.1.2. Composition constante des composés

Q.2. Le sulfure d'hydrogène (H_2S) réagit avec le dioxyde de soufre (SO_2) pour former l'eau (H_2O) et le soufre (S). L'équation bilan équilibrée de la réaction qui se produit est la suivante :
(entourer la lettre correspondant à la proposition exacte)



e. Autre

Tableau 4: Fréquences des différentes catégories de réponses des apprenants à la deuxième question

Enoncé de catégorie	Fréquences				Total général
	3 ^{ième}	2 ^{nde}	1 ^{ière}	Tle	
a	9,52%	7,50%	3,57%	2,63%	6,70%
b	41,90%	37,50%	64,29%	68,42%	50,63%
c	26,67%	30,00%	23,21%	18,42%	25,10%
d	17,14%	22,50%	7,14%	10,53%	14,64%
e	0,00%	2,50%	0,00%	0,00%	0,42%
ajout de charges	0,95%	0,00%	0,00%	0,00%	0,42%
autre	1,90%	0,00%	1,79%	0,00%	1,26%
pas de réponse	1,90%	0,00%	0,00%	0,00%	0,84%
Total général	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%

Le tableau 4 montre qu'un total de 50,63% des élèves identifient correctement l'équation bilan équilibrée de la réaction. Plus précisément, nous avons 41,90% en classe de 3^{ième}, 37,50% en classe de 2^{nde}, 64,29% en classe de 1^{ière} et 68,42% en classe de Tle. Par ailleurs, nous avons un taux de 48,53% de mauvaises réponses ce qui montre la grande proportion d'élèves qui n'ont pas conscience de la composition constante des composés.

Cependant, les justifications données par les élèves qui optent pour la proposition b sont variables. Nous avons pu relever 3 cas de figure :

- Des élèves qui justifient leur choix par le fait que l'équation soit bien équilibrée. Ils ne nous laissent cependant pas comprendre pourquoi ils jettent leur dévolu sur le cas b plutôt que sur a ou même c qui correspondent elles aussi à des équations bien équilibrées.
- Des élèves qui semblent avoir essayé d'équilibrer l'équation sur un brouillon avant de choisir la bonne réponse. Ils justifient donc leur réponse par : « *parceque quand je calcule c'est ce que ça me donne* ». Pour effectuer ce « calcul », ils ont donc dus identifier, avec succès, dans le texte, les réactifs et produits de la réaction avant de l'équilibrer correctement ensuite.
- Des élèves qui dans leur justification évoquent la conformité des réactifs et produits de la réaction avec les données du libellé. Ceux-ci semblent conscients de l'identité constante des composés puisqu'ils défendent leur choix en expliquant l'incongruité des autres.

5.1.3 Signification du coefficient stœchiométrique

Q.3. On fait réagir trois mol de diazote (N_2) et deux mol de dihydrogène (H_2) pour former de l'ammoniac (NH_3). Ecrire l'équation bilan de la réaction de formation de l'ammoniac.

Tableau 5: fréquences des différentes catégories de réponses des élèves à la troisième question

Enoncé de la catégorie	Fréquences				Total général
	3ième	2nde	1ière	Tle	
bonne réponse	23,81%	20,00%	44,64%	31,58%	29,29%
confusion réactifs/produits	1,90%	0,00%	0,00%	0,00%	0,84%
équation mal équilibrée	1,90%	7,50%	1,79%	5,26%	3,35%
équation non équilibrée	21,90%	2,50%	5,36%	7,89%	12,55%
quantité de matière initiale = coefficient stœchiométrique	21,90%	40,00%	35,71%	39,47%	30,96%
mauvais réactif et/ou produit	1,90%	20,00%	10,71%	13,16%	8,79%
autre	20,00%	0,00%	0,00%	0,00%	8,79%
pas de réponse	6,67%	10,00%	1,79%	2,63%	5,44%
Total général	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%

Le tableau 5 montre les différentes catégories de réponses des élèves à la question 3. Mentionnons que, dans l'optique de limiter le nombre de catégories, nous avons classé dans la

catégorie « autre » les élèves qui confondent réactifs et produits, écrivent une équation avec des composés non mentionnés dans l'énoncé, ajoutent les charges, utilisent la mise en solution.

L'analyse des données du tableau révèle que le pourcentage de bonnes est de 29,29% toutes les classes confondues. En particulier, nous avons 23,81% de bonnes réponses en 3^{ème}, 20,00% en classe de 2^{nde}, 44,64% en 1^{ère} et 31,58% en Tle. Ce qui signifie que, parmi les trois niveaux étudiés, les élèves de 1^{ère} sont plus aptes à écrire l'équation bilan d'une réaction à partir de la donnée de l'expérience et ceux de 2^{nde} le sont moins. Le pourcentage général de cette catégorie, ajouté à la somme du pourcentage des élèves qui ne pense pas à équilibrer ou équilibrent mal l'équation bilan de réaction (46,03%) montre la proportion d'élèves qui n'assimile pas le coefficient stœchiométrique à la quantité de matière initiale du réactif.

30,96% des élèves, en majorité en classe de 2^{nde} confondent le coefficient stœchiométrique à la quantité de matière initiale de réactif. Ils ont donc construit des significations non pertinentes du coefficient stœchiométrique. Et en empruntant cette voie, se retrouvent incapables d'équilibrer l'équation bilan de la réaction bien qu'ayant correctement identifié réactifs et produits. Ou alors traduisent le « de » de l'énoncé (... de l'ammoniac) comme un coefficient stœchiométrique unitaire. Il s'agit en particulier de 21,90% des élèves de 3^{ème}, 40,00% des apprenants de la classe de 2^{nde}, 35,71% de ceux 1^{ère} et 39,47% de ceux de Tle. Curieusement, cette conception, pourtant erronée, semble aller grandissante à mesure que les élèves évoluent dans leur cursus. Nous nous posons la question de savoir pourquoi.

12,55% de l'échantillon ne pense pas à équilibrer l'équation, se contentant de placer correctement les réactifs et produits aux bons endroits. Comme dans le cas de la question précédente les élèves pensent qu'une simple organisation des composés mis en jeu en réactifs et produits suffit à obtenir l'équation bilan d'une transformation. Ceci peut déjà nous conduire à nous prononcer sur l'idée de conservation des atomes. En effet, le fait que les élèves ne pensent pas spontanément à équilibrer l'équation bilan pourrait être signe de ce qu'ils n'ont pas compris l'idée de conservation des éléments au cours d'une réaction chimique.

5.1.4. Conservation des éléments au cours d'une réaction chimique

Q.4.

La combustion d'un corps A dans le dioxygène (O₂) de l'air produit du dioxyde de carbone (CO₂) et de l'eau (H₂O). D'où proviennent les éléments carbone et hydrogène présents dans les produits ?

Tableau 6: Fréquences des différentes catégories de réponses des élèves à la quatrième question

Enoncé de la catégorie	Fréquences				Total général
	3 ^{ième}	2 ^{nde}	1 ^{ière}	Tle	
corps A	2,86%	0,00%	23,21%	28,95%	11,30%
combustion	15,24%	27,50%	16,07%	0,00%	15,06%
réaction chimique	3,81%	0,00%	0,00%	2,63%	2,09%
combustion/dissociation/ destruction du corps A	7,62%	22,50%	16,07%	21,05%	14,23%
écriture d'une équation	0,00%	0,00%	1,79%	7,89%	1,67%
produit	8,57%	5,00%	3,57%	0,00%	5,44%
réactifs	8,57%	0,00%	7,14%	2,63%	5,86%
un composant chimique	0,95%	0,00%	1,79%	0,00%	0,84%
donnée du texte	11,43%	17,50%	3,57%	5,26%	9,62%
Réponse hors contexte	0,95%	15,00%	8,93%	5,26%	5,86%
pas de réponse	40,00%	12,50%	17,86%	26,32%	28,03%
Total général	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%

Le tableau 6 ci-dessus montre que :

11,30% de notre échantillon pense que les éléments carbone et hydrogène proviennent du corps A. en particulier, il s'agit de 2,86% des élèves de 3^{ième}, 00,00% des élèves de 2^{nde}, 23,21% des élèves de 1^{ière}, 28,95% des élèves de Tle ; un taux croissant à mesure que le niveau s'élève (si nous excluons la classe de 2^{nde}). Cette proportion d'élèves semble avoir construit des significations pertinentes de la conservation des éléments au cours d'une réaction chimique. Mentionnons que parmi les élèves de 1^{ière} et de terminale, certains font des hypothèses sur la nature du composé A, en écrivent des réponses telles : « *les éléments carbonés et hydrogène proviennent du composé A qui est un hydrocarbure* ». Ceci est en droite ligne avec la transposition didactique puisqu'à partir de la classe de 1^{ière}, l'étude des hydrocarbures et par ricochet de leur combustion est régulièrement traitée.

Les catégories combustion, réaction chimique, combustion/ dissociation de A se rapportent à une seule signification : celle selon laquelle la réaction chimique produit des éléments chimiques ; signification non pertinente. Pour eux, ces éléments sont soit les produits de la réaction de combustion du corps A, soit le produit de la combustion des réactifs, ou encore le produit de la combustion du carbone et de l'hydrogène. Cette idée est développée par 27,63% des élèves interrogés parmi lesquels 26,67% des élèves de 3^{ième}, 50,00% des élèves de 2^{nde}, 32,14% des élèves de 1^{ière} et 23,68% des élèves de Tle.

0,84% des élèves soit 0,95% des élèves de la classe de 3^{ième} et 1,79% de la classe de 1^{ière} attribuent la présence de ces éléments à « un composant chimique » ; un composant qu'ils ne semblent pas à mesure d'identifier. Ils donc au niveau symbolique puisqu'ils se basent sur l'idée selon laquelle les « composés chimiques » sont formés d'atomes.

5,86% des apprenants parmi lesquels 8,57% des élèves de 3^{ième}, 7,14% des élèves de 1^{ière} et 2,63% des élèves de la classe de Tle pensent que les éléments carbone et hydrogène proviennent des réactifs. Ils sont donc capables de réciter la règle : les atomes des produits sont identiques à ceux des réactifs, mais n'arrivent pas à décrire précisément de quel réactif il s'agit. Ils restent donc au niveau symbolique. Pour renchérir cette idée, mentionnons que certains élèves donnent comme réponse « *corps A et O₂* ». La formule du dioxygène étant donnée et ne contenant ni élément carbone ni élément hydrogène, une conceptualisation pertinente de la règle les aurait poussé à attribuer l'origine de ces éléments au corps A.

5,44% des élèves dont 8,57% des élèves de la classe de 3^{ième}, 5,00% des élèves de 2^{nde} et 3,57% des élèves de 1^{ière} pensent que les éléments carbone et hydrogène présents dans les produits proviennent des produits eux-mêmes. Leur réponse est basée uniquement sur les formules brutes des produits dans lesquelles ils identifient les lettres C et H. ils restent donc, eux aussi au niveau symbolique. Notons cependant que pendant que certains mentionnent que « *dioxyde de carbone et eau* » d'autres se limitent à « *dioxyde de carbone* » ou « *eau* ».

1,67% (élèves de 1^{ière} et Tle) écrivent une équation cela nous rappelle ces exercices de chimie organique où il est question, à partir de la combustion et de la donnée de la composition centésimale, de déterminer la formule brute d'un composé. Ce qui nous permet de penser que ces élèves travaillent de façon très mécanique, essayant de se remémorer les types de situations auxquelles ils ont déjà fait face pour tenter de produire une réponse. C'est l'exemple de cet élève de Tle qui pense à écrire l'équation de combustion d'un composé carbonyle.

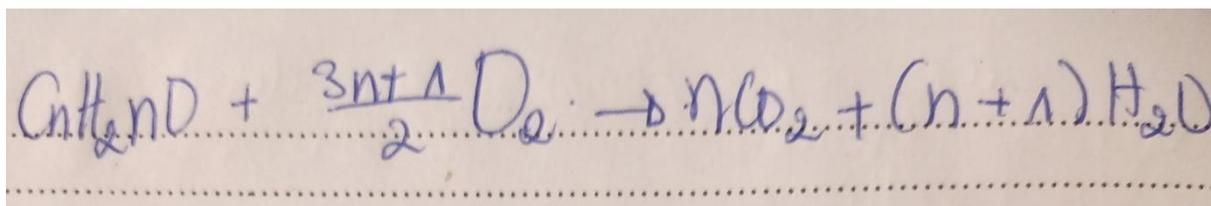


Figure 12: réponse d'un apprenant de T1e à la quatrième question

9,62% des élèves associent juste des données de l'énoncé pour formuler leur réponse. Dans cette catégorie, on retrouve des réponses telles que : « les éléments carbone et hydrogène proviennent de l'eau et de l'air » ou encore « les éléments carbone et hydrogène proviennent de la fumée » ou même les « éléments carbone et hydrogène proviennent de la vapeur ». Ces apprenants prêtent des origines pas toujours scientifiques aux éléments carbone et hydrogène. Ils restent donc, pour cette raison, encore au niveau symbolique.

A côté de cela, 5,86% donnent des réponses hors contexte telles « un dépôt noir et l'eau qui s'échappe », « destruction du squelette carboné de A », « hydrolyse », « méthane », ... eux aussi se trouvent u niveau symbolique.

5.1.5. Mélange stœchiométrique et détermination de la quantité de matière de produit formé connaissant la quantité de matière initiale d'un réactif

5.1.5.1. Mélange stœchiométrique au niveau macroscopique

La réaction du fer avec le dioxygène est modélisée par l'équation bilan suivante :



Q.5. Quelle est la quantité de matière de dioxygène (O₂) nécessaire pour faire réagir complètement 2 mol de fer ?

Tableau 7: Fréquences des différentes catégories de réponse des élèves à la cinquième question

Enoncé des catégories	Fréquences				Total général
	3 ^{ième}	2 ^{nde}	1 ^{ière}	Tle	
bonne réponse	4,76%	40,00%	62,50%	84,21%	36,82%
Mauvaise conceptualisation de la quantité de matière	12,38%	0,00%	7,14%	5,26%	7,95%
règle de 3	1,90%	2,50%	0,00%	0,00%	1,26%
réponses hasardeuses/non justifiées	10,48%	12,50%	3,57%	0,00%	7,53%
usage de m/M	33,33%	17,50%	8,93%	2,63%	20,08%
usage des formules moléculaires	5,71%	0,00%	0,00%	0,00%	2,51%
usage du nombre d'Avogadro	3,81%	2,50%	0,00%	2,63%	2,51%
combinaison des données du libellé	0,00%	0,00%	0,00%	2,63%	0,42%
pas de réponse	27,62%	25,00%	17,86%	2,63%	20,92%
Total général	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%

Le tableau ci-dessus nous montre que 36,82% des élèves interrogés sont capables de déterminer la quantité de matière d'un réactif nécessaire à la réaction totale avec une quantité précise d'un autre réactif. Il s'agit en particulier de 4,76% des élèves de 3^{ième}, 40,00% des élèves de 2^{nde}, 62,50% des élèves de 1^{ière} et 84,2% des élèves de la classe de Tle. En classe de 3^{ième}, comme nous l'avons montré dans l'analyse des notes de cours de quelques enseignants, la relation de proportionnalité entre les quantités de matière de réactifs qui réagissent et les coefficients stœchiométrique n'est pas ou peu construite. C'est ce qui explique leur quasi incapacité à résoudre ce type de problèmes. En classes de 2^{nde}, 1^{ière} et de Tle, La résolution de bon nombre d'exercices nécessite de faire appel à cette relation ce qui les contraint, même de façon mécanique à savoir l'utiliser.

20,08% des élèves pensent à poser la formule de calcul de la quantité de matière : $n = \frac{m}{M}$. Il s'agit de 33,33% des élèves de a classe de 3^{ième}, 17,50% des élèves de 2^{nde}, 8,93% des élèves de la classe de 1^{ière} et 2,63% des élèves de la classe de Tle. Cette formule est adaptée au calcul de la quantité de matière d'un composé et non pas à la déduction de la quantité de matière d'un composant engagé dans une réaction connaissant celle de l'autre. Il est tout de même très intéressant de se pencher sur ce que les apprenants considèrent comme masse, comme masse molaire et surtout sur le composé avec lequel ils choisissent de travailler. A partir de la figure ci-dessous, analysons le cheminement emprunté par cet apprenant de la classe de 3^{ième}.

Activité 5 : Mélange stœchiométrique et détermination de la quantité de matière de produit formé connaissant la quantité de matière initiale d'un réactif

La réaction du fer avec le dioxygène est modélisée par l'équation bilan suivante :

$$4\text{Fe} + 3\text{O}_2 \longrightarrow 2\text{Fe}_2\text{O}_3$$

Q.5. Quelle est la quantité de matière de dioxygène (O₂) nécessaire pour faire réagir complètement 2 mol de fer ?

Je calcule la masse molaire $4 \times 56 + 6 \times 16 = 224 + 96$
 Je déduis n $n = \frac{m}{M}$ $2 = \frac{6,25}{320} = 320 \text{ g/mol}$
 Je fais 6,25 mol 320

Figure 13: détermination de la quantité de matière de dioxygène nécessaire à la réaction avec 2 mol de fer par un apprenant de la classe de 3^{ème}

Premièrement, cet élève considère la quantité de matière donnée comme une masse. Deuxièmement, il calcule la masse molaire de l'ensemble (4Fe 3O₂). Ceci nous rappelle, dans la transposition didactique par les enseignants, cette représentation qui consistait à monter que tous les symboles à gauche de l'équation constituaient les réactifs. Cet apprenant a donc construit l'idée selon laquelle l'ensemble (4Fe 3O₂) constitue un réactif. Il est important de noter que ce raisonnement a également été retrouvé en classe de 1^{ère}. De façon globale, et au même titre que tous les apprenants de cette catégorie, ces apprenants n'ont pas construit une signification pertinente de la relation $n = \frac{m}{M}$. Ils restent au niveau symbolique, tentant d'attribuer des valeurs numériques à toutes les variables mises en relation.

Un total de 1,26% des élèves interrogés, exclusivement en classes de 3^{ème} et 2^{nde} utilise une règle de 3 pour répondre à la question. Ils laissent donc tout le formalisme développé dans le cours pour tenter de créer leur propre algorithme de résolution du problème. Analysons donc la production de cet élève :

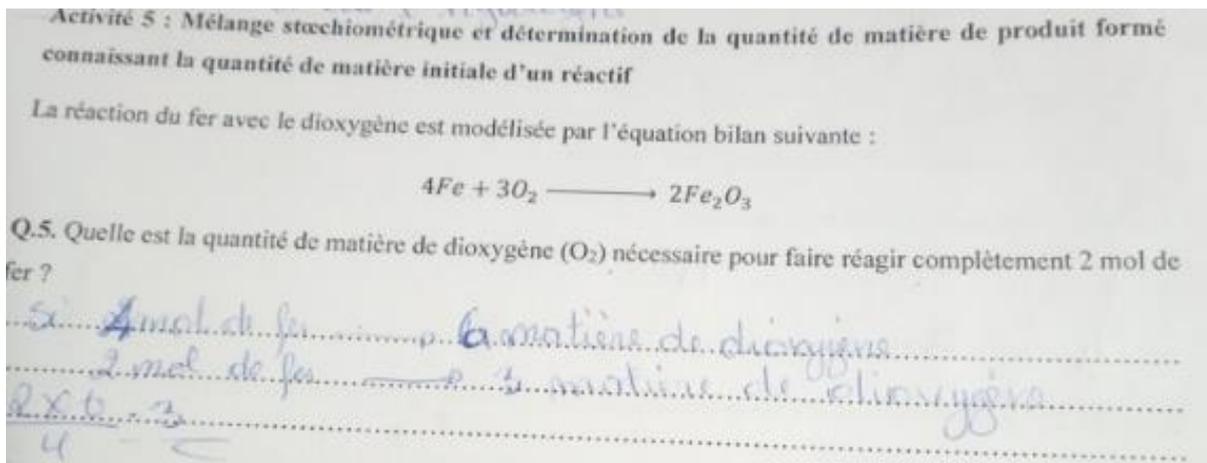


Figure 14: détermination de la quantité de matière de dioxygène nécessaire à la réaction avec 2 mol de fer à partir de la règle de 3 par un élève de 3^{ème}

Il part des données de l'équation bilan pour ensuite revenir au cas précis de l'exercice. Malheureusement, sa traduction de l'équation bilan n'est pas la bonne. L'élève se situe beaucoup plus dans le cas de l'équilibrage d'une équation bilan durant lequel l'attention est portée sur les éléments et pas sur les composés. C'est pourquoi il parle de « 6 dioxygène ». Il ne se rend cependant pas compte que « dioxygène » renvoie à « O₂ », non pas à « O ». L'idée selon laquelle l'équation bilan fixe les proportions dans lesquelles les réactifs réagissent semble bien construite. Mais, un problème lié aux significations du coefficient stœchiométrique fait obstacle à sa bonne application.

Observons la production de cet autre élève

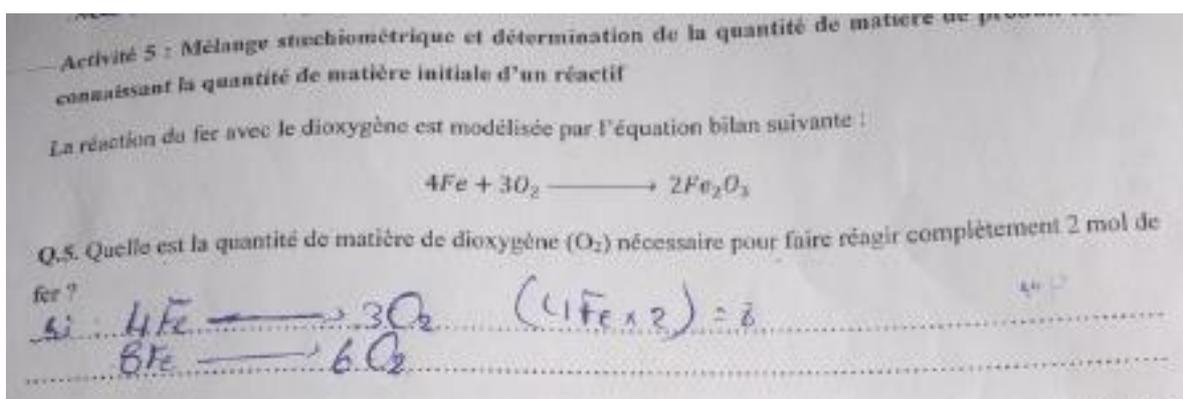


Figure 15: essai de détermination de la quantité de matière de dioxygène nécessaire pour la réaction complète avec 2 mol de fer par un apprenant de 3^{ème}

Cet apprenant se contente d'écrire des symboles sans donner une réponse claire à la question. L'idée que l'équation bilan puisse être responsable des proportions de réaction entre les réactifs

semble être acquise, mais l'élève fait face à une difficulté de compréhension des différents symboles de l'équation bilan (Dehon & Snauwaert, 2015).

Chez 7,95% des apprenants interrogés, on observe une mauvaise conceptualisation de la quantité de matière. Ils l'assimilent tantôt au coefficient stœchiométrique, tantôt à la masse molaire.

2,51% des élèves utilisent la relation entre le nombre de moles et le nombre d'Avogadro confondant cette fois-ci le nombre d'atomes à la quantité de matière. 2,51% des élèves, exclusivement en classe de 3^{ème} donnent comme réponse des formules moléculaires telles que $2\text{Fe}_2\text{O}_3$, $2\text{O}_2-4\text{Fe}$, 3O_2 . Enfin, 7,53% donne des réponses hasardeuses, sans aucune justification.

5.1.5.2. Mélange stœchiométrique au niveau microscopique

Q.6. Quel est le nombre de molécules de dioxygène (O_2) nécessaire pour la réaction totale avec huit atomes de fer ?

Tableau 8: fréquences des différentes catégories de réponses des élèves à la sixième question

Enoncé de la catégorie	Fréquences				Total général
	3 ^{ème}	2 ^{nde}	1 ^{ère}	Tle	
bonne réponse	0,95%	0,00%	7,14%	2,63%	2,51%
"multiplication" de l'équation bilan/ règle de 3	0,95%	20,00%	23,21%	18,42%	12,13%
relation au niveau macroscopique	0,95%	7,50%	8,93%	26,32%	7,95%
réponses hasardeuses/ non justifiées/ calcul non scientifique	27,62%	32,50%	16,07%	7,89%	22,59%
Usage de formules moléculaires	1,90%	0,00%	1,79%	0,00%	1,26%
usage de m/M	7,62%	2,50%	1,79%	2,63%	4,60%
usage du nombre d'Avogadro	6,67%	12,50%	0,00%	7,89%	6,28%
Mauvais raisonnement	2,86%	0,00%	14,29%	7,89%	5,86%
pas de réponse	50,48%	25,00%	26,79%	26,32%	36,82%
Total général	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%

Le tableau ci-dessus montre que seuls 2,51% des apprenants interrogés parviennent à la bonne réponse à cette question c'est-à-dire écrivent et utilisent correctement la relation de proportionnalité entre les quantités de réactifs au niveau microscopique. Il s'agit de 0,95% des

apprenants de la classe de 3^{ième}, 0,00% des apprenants de la classe de 2^{nde}, 7,14% des apprenants de la classe de 1^{ière} et 2,63% des apprenants de Tle. Ces apprenants ont construit des significations pertinentes des proportions stœchiométriques au niveau microscopique.

12,13% des élèves sondés pensent soit à « multiplier » l'équation, soit à faire une règle de 3 (classe de 3^{ième} majoritairement). Cette catégorie regroupe 0,95% des apprenants de la classe de 3^{ième}, 20,00% de ceux de la classe de 2^{nde}, 23,21% des apprenants de 1^{ière} et 18,42% des apprenants de Tle. Observons quelques productions :

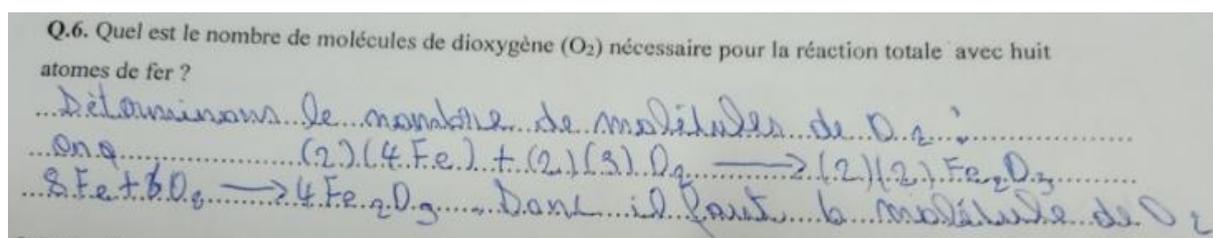


Figure 16: Réponse d'un apprenant de 1^{ière} à la sixième question

Cet apprenant, voyant que le nombre d'atomes de fer est un multiple de son coefficient stœchiométrique, multiplie l'équation bilan par ce coefficient de proportionnalité et la réécrit. Ce faisant il n'a non seulement pas construit une signification pertinente de la notion de proportions stœchiométriques au niveau microscopique, mais sa compréhension de l'équation bilan reste au niveau symbolique.

Cet autre apprenant, empruntant la même voie, trouve cependant un résultat différent :

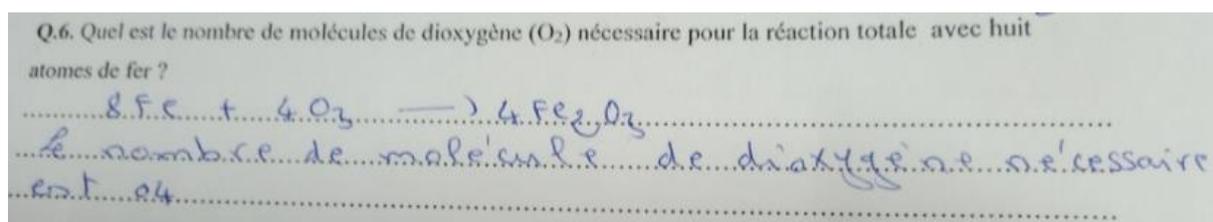


Figure 17: réponse d'un apprenant de Tle à la sixième question

Celui-ci se retrouve à faire une réaction entre le fer et l'ozone. L'hypothèse que nous émettons est qu'il ait voulu donner à l'élément oxygène des réactifs un indice similaire à celui qu'il possède dans le produit. Cet apprenant voit lui aussi l'équation bilan et tout ce qu'elle comporte au niveau symbolique, et en plus nous montre un autre signe palpable d'une mauvaise conceptualisation de la composition constante des composés.

7,95% des apprenants interrogés utilisent la relation au niveau macroscopique. Il s'agit de 0,95% des apprenants de 3^{ième}, 7,50% des apprenants de 2^{nde}, 26,32% des apprenants de 1^{ière} et 8,93% des apprenants de Tle. Notons que notre affirmation se base sur les symboles utilisés par lesdits élèves. On utilise souvent le « n » au niveau macroscopique et « N » au niveau microscopique. Ainsi, pour répondre à la question, ils continuent d'utiliser le « n ». Pendant que certains font le rapport de « n » par le coefficient stœchiométrique, d'autres utilisent le nombre d'atomes. C'est l'exemple de l'apprenant ci-dessous :

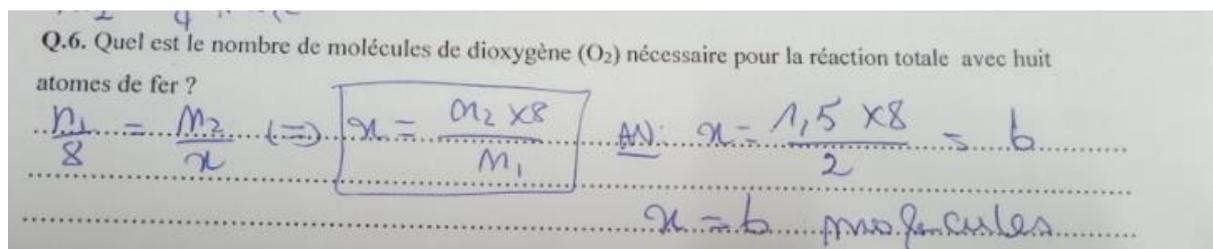


Figure 18: réponse d'un apprenant de la classe de Tle à la sixième

Alors qu'il n'y a aucun lien avec la question précédente, il utilise néanmoins ses données pour résoudre ce problème. Ce qui montre une construction de signification non pertinente de la relation de proportionnalité entre les quantités de réactifs qui réagissent au niveau microscopique.

22,59% des élèves donnent des réponses hasardeuses ou non justifiées. Nous déduisons par-là la construction de significations non pertinentes de la notion de proportions stœchiométrique au niveau microscopique. 6,28% des élèves utilisent le nombre d'Avogadro. Pourtant, celui-ci est adapté au calcul du nombre d'atomes/molécule d'une substance connaissant sa quantité de matière et pas à la déduction du nombre d'atomes/molécules d'un réactif connaissant celui de l'autre. 7,04% empruntent des raisonnements erronés

5.1.5.3. Détermination de la quantité de matière de produit formé connaissant la quantité d'un réactif consommé

Tableau 9: Fréquences des différentes catégories de réponses des élèves à la septième question

Enoncé de la catégorie	Fréquences				Total général
	3 ^{ième}	2 ^{nde}	1 ^{ière}	Tle	
bonne réponse	4,76%	20,00%	55,36%	65,79%	28,87%
coefficient stœchiométrique	0,95%	0,00%	1,79%	5,26%	1,67%
4Fe+3O ₂	0,95%	0,00%	0,00%	0,00%	0,42%
combinaison des données	0,00%	2,50%	0,00%	5,26%	1,26%
usage de m/ M	25,71%	17,50%	8,93%	2,63%	16,74%
usage du nombre d'Avogadro	2,86%	0,00%	0,00%	2,63%	1,67%
réponse hasardeuse	9,52%	20,00%	3,57%	0,00%	8,37%
autre	1,90%	0,00%	7,14%	2,63%	2,93%
pas de réponse	53,33%	40,00%	23,21%	15,79%	38,08%
Total général	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%

Le tableau 9 ci-dessus nous montre que 28,87% des élèves interrogés sont capables de déterminer la quantité de matière de produit formé connaissant la quantité de matière de réactif consommé. Il s'agit de 4,76% des élèves de 3^{ième}, 20,00% des apprenants de 2^{nde}, 55,36% des élèves de 1^{ière} et 65,79% des élèves de Tle. Le très faible taux de bonnes réponses enregistré en classe de 3^{ième} n'est que naturel vu la transposition didactique de l'exploitation d'une équation bilan par les enseignants.

1,67% des élèves sondés pensent que la quantité de matière de produit formé est égale au coefficient stœchiométrique dudit produit. Il s'agit de 0,95% des élèves de 3^{ième}, 0,00% des apprenants de 2^{nde}, 1,79% des élèves de 1^{ière} et 5,26% des élèves de la classe de Tle. Curieusement, le taux de cette mauvaise conception augmente à mesure que le niveau des apprenants lui aussi augmente.

1,67% des apprenants pensent à utiliser le nombre d'Avogadro. Ils se situent au niveau symbolique au même titre que ceux aussi font une combinaison des données de l'exercice (1,26%), ceux qui donnent des réponses hasardeuses (8,37%) ou même ceux qui utilisent le rapport de la masse par la masse molaire (16,74%). Notons que cette dernière catégorie vient majoritairement des élèves de 3^{ième} (25,71% du nombre total d'élèves de 3^{ième}) ce qui nous permet, au regard des données précédentes, de penser que les apprenants de la classe de 3^{ième} ont construit des significations du concept de quantité de matière majoritairement au niveau symbolique. Ils semblent faire spontanément appel à cette relation à chaque fois que le terme

quantité de matière est employé ne faisant ni attention aux données du texte, ni au contexte dans lequel ils se trouvent.

5.1.6. Signification du coefficient stœchiométrique et détermination de la quantité de matière d'un produit à partir d'un mélange non stœchiométrique

La réaction du fer avec le dioxygène est modélisée par l'équation bilan suivante :



5.1.6.1. Signification du coefficient stœchiométrique

Q.8. Le chiffre 4 placé devant le symbole « Fe » représente : **(entoure la ou les lettre (s) correspondant à la proposition exacte)**

- La quantité de matière de fer (Fe) à l'état initial
- Le nombre d'atomes de fer (Fe) nécessaire pour réagir complètement avec 3 molécules de dioxygène (O₂)
- Le nombre d'atomes de fer (Fe) à l'état initial
- La quantité de matière de fer (Fe) nécessaire pour réagir complètement avec 3 mol de dioxygène (O₂)
- Autre

Tableau 10: Fréquences des différentes catégories de réponses des apprenants à la huitième question

Enoncé de la catégorie	Fréquences				Total général
	3 ^{ième}	2 ^{nde}	1 ^{ière}	Tle	
a	11,43%	5,00%	3,57%	0,00%	6,69%
a, c	1,90%	0,00%	5,36%	0,00%	2,09%
a,b	0,95%	0,00%	0,00%	0,00%	0,42%
a,d	2,86%	2,50%	1,79%	0,00%	2,09%
autre	1,90%	0,00%	1,79%	0,00%	1,26%
b	25,71%	42,50%	42,86%	47,37%	35,98%
b, c	2,86%	5,00%	3,57%	10,53%	4,60%
b,d	2,86%	0,00%	1,79%	2,63%	2,09%
c	19,05%	15,00%	19,64%	21,05%	18,83%
coefficient stœchiométrique	11,43%	5,00%	10,71%	10,53%	10,04%
d	11,43%	17,50%	5,36%	5,26%	10,04%
e	0,00%	2,50%	0,00%	0,00%	0,42%
pas de réponse	7,62%	5,00%	3,57%	2,63%	5,44%
Total général	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%

Le tableau 10 révèle que les significations que les élèves prêtent au coefficient stœchiométriques se trouvent à plusieurs niveaux et que certains apprenants le placent simultanément à tous les trois niveaux.

Plus précisément,

6,69% pensent que le chiffre 4 placé représente la quantité de matière initiale du fer. Cette conception, erronée, nous rappelle les productions de la troisième question. Son faible taux soulève cependant des interrogations. A côté de cela, un pourcentage plus grand (18,83%) soit 19,05% des élèves de 3^{ième}, 15,00% des apprenants de 2^{nde}, 19,64% des élèves de 1^{ière} et 21,05% des élèves de Tle pensent qu'il s'agit du nombre d'atomes de fer à l'état initial. Ces deux idées, erronées, sont reprises l'une de l'autre respectivement aux niveaux macroscopique et microscopique. Les items précédents nous ont révélé qu'environ 30,96% des apprenants assimilent le coefficient stœchiométrique du réactif à sa quantité de matière initiale (question3).

Certains élèves pensent que le chiffre 4 représente à la fois la quantité de matière fer à l'état initial et la quantité de matière de fer nécessaire pour réagir complètement avec 3 mol de dioxygène. Notons qu'ils représentent 2,09% de la population testée. Ces apprenants voient

globalement en le coefficient stœchiométrique une quantité de matière ce qui les situe au niveau macroscopique. Seulement, ils ignorent de quelle quantité de matière il s'agit exactement.

35,98% des élèves et en particulier 25,71% des apprenants de la classe de 3^{ième}, 42,50% de ceux de 2^{nde}, 42,86% de ceux de la classe de 1^{ière}, 47,37% de ceux de la classe de Tle pense que le chiffre 4 représente le nombre le nombre d'atomes de fer nécessaire pour réagir complètement avec 3 molécules de dioxygène. Certains se justifient en arguant qu'il s'agit du coefficient stœchiométrique, montrant clairement le sens qu'ils accordent, dans ce cas précis au coefficient stœchiométrique (Ces élèves situent bien le coefficient stœchiométrique au niveau microscopique), d'autres n'apportent aucune justification. Ces résultats ne sont pas vraiment en accord avec les observations de la question 6. Puisqu'à ce niveau, seuls 3,02% des élèves interrogés parvenaient à déterminer le nombre de molécules de dioxygène nécessaire à la réaction totale avec 8 atomes de fer. De plus, même si nous tenons compte de ceux qui « multipliaient » l'équation bilan, ils n'ont représenté que 10,55% de l'échantillon. Tout ceci nous permet de ressortir le caractère dépendant des situations que revêtent les conceptions des apprenants.

Par ailleurs, 10,04% des apprenants pensent que le chiffre 4 représente la quantité de matière de fer nécessaire pour réagir complètement avec 3 mol de dioxygène. Il s'agit précisément de 11,43% des apprenants de 3^{ième}, 17,50% des apprenants de 2^{nde}, 5,36% de ceux de 1^{ière} et 5,26% de ceux de Tle. Ils semblent voir le coefficient stœchiométrique au niveau macroscopique.

2,09% des apprenants soit 2,86% des apprenants de la classe de 3^{ième}, 0,00% des apprenants de 2^{nde}, 1,79% de ceux de 1^{ière} et 2,63% de ceux de Tle pensent que le chiffre 4 représente le nombre d'atomes de fer nécessaire pour réagir complètement avec 3 molécules de dioxygène et la quantité de matière de fer nécessaire pour réagir avec 3 mol de dioxygène. Ils semblent donc situer clairement le coefficient stœchiométrique aux niveaux microscopique et macroscopique, bien qu'ils ne justifient pas leur opinion.

10,04% des apprenants soit 11,43% de ceux de la classe de 3^{ième}, 5,00% de ceux de 2^{nde}, 10,71% de ceux de 1^{ière} et 10,53% de ceux de Tle pensent qu'il s'agit du coefficient ou du nombre stœchiométrique. Ceux-ci ne peuvent se défaire des significations symboliques du coefficient stœchiométriques de la réaction et se défendant soit en prétendant que « *le nombre placé devant une formule est le coefficient stœchiométrique* » ou qu' « *il sert à équilibrer l'équation* ». Tout comme ceux qui pensent que le chiffre placé représente le nombre de molécules de fer

nécessaire pour équilibrer l'équation, ils situent le coefficient stœchiométrique au niveau purement symbolique.

5.1.6.2. Détermination de la quantité de matière de produit formé à partir d'un mélange non stœchiométrique

On mélange 5 mol de dioxygène (O₂) et 3 mol de fer (Fe). La réaction qui se produit est modélisée par l'équation bilan suivante : $4Fe + 3O_2 \longrightarrow 2Fe_2O_3$

Q.9. La quantité de matière d'oxyde de fer III (Fe₂O₃) qui se forme à la fin de la réaction est : (entoure la lettre correspondant à la proposition exacte)

- a. 4 mol
- b. 2 mol
- c. 1, 5 mol
- d. 3,33 mol
- e. Autre

Tableau 11: Fréquences des différentes catégories de réponses des apprenants à la neuvième question

Enoncé de la catégorie	Fréquences				Total général
	3ième	2nde	1ière	Tle	
a	20,00%	0,00%	3,57%	7,89%	10,88%
a,b	0,00%	0,00%	1,79%	0,00%	0,42%
a,c	0,00%	0,00%	0,00%	2,63%	0,42%
b	15,24%	30,00%	19,64%	5,26%	17,15%
b,c	0,00%	0,00%	1,79%	2,63%	0,84%
b,d	0,00%	0,00%	0,00%	2,63%	0,42%
c	35,24%	40,00%	37,50%	28,95%	35,56%
c avec vérification des proportions stœchiométriques	0,00%	0,00%	1,79%	5,26%	1,26%
b, avec vérification des proportions stœchiométriques	0,00%	2,50%	0,00%	0,00%	0,42%
c, d	0,95%	0,00%	3,57%	5,26%	2,09%

d	8,57%	12,50%	10,71%	15,79%	10,88%
e	0,95%	7,50%	14,29%	7,89%	6,28%
pas de réponse	19,05%	7,50%	5,36%	13,16%	12,97%
réécriture de l'équation bilan	0,00%	0,00%	0,00%	2,63%	0,42%
Total général	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%

A la différence des questions de l'activité 5, celles de la présente activité sont formulées sous la forme de QCM, ce qui a pour effet d'amener les élèves à faire des choix hasardeux ou à trouver des stratégies pour organiser les données de manière à obtenir, à tous les prix, l'une des propositions. Nous pensons également que c'est la raison pour laquelle le taux de non réponse chez les apprenants de 3^{ème} en particulier est plus faible que dans l'activité précédente. Nous essayerons d'analyser les données du tableau 6 ci-dessus en mettant en lumière les différents raisonnements adoptés par les élèves pour aboutir à leurs choix respectifs.

Le tableau 11 nous montre que 10,88% de l'échantillon total pense que la quantité de matière d'oxyde fer (III) formée est de 4 mol. Ils assimileraient donc, selon notre analyse a priori, la quantité de matière de produit formé au coefficient stœchiométrique d'un réactif. Pourtant tous n'ont pas la même conception. Prenons le cas de l'élève ci-dessous

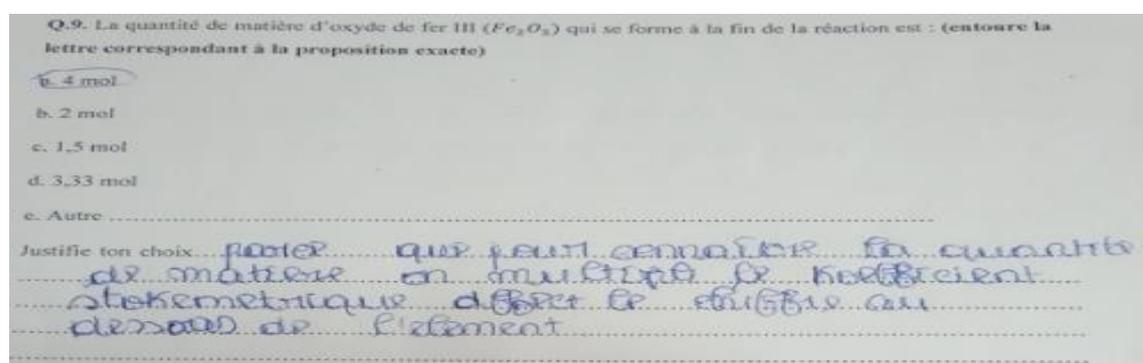


Figure 19: détermination de la quantité de matière d'oxyde de fer (II) par un élève de 3^{ème}.

Cet apprenant semble transférer la règle d'équilibrage des équations à la détermination de la quantité de matière de produit. Pour lui, la réaction chimique se trouve au niveau symbolique comme décrite dans l'équation bilan. Les quantités de matière (niveau macroscopique) ou le nombre de molécules /atomes présents dans le milieu n'ont aucune influence sur le déroulement de la réaction. Par là il attribue une signification non pertinente à la quantité de matière d'un produit formé la réduisant au produit du coefficient stœchiométrique et de l'indice.

En classe de Tle, le 4 s'obtient souvent par une combinaison des données du texte sans que le fondement scientifique ne puisse facilement être décelé.

On mélange 5 mol de dioxygène (O₂) et 3 mol de fer (Fe). La réaction qui se produit est modélisée par l'équation bilan suivante : $4Fe + 3O_2 \longrightarrow 2Fe_2O_3$

Q.9. La quantité de matière d'oxyde de fer III (Fe₂O₃) qui se forme à la fin de la réaction est : (entoure la lettre correspondant à la proposition exacte)

a. 4 mol

b. 2 mol

c. 1,5 mol

d. 3,33 mol

e. Autre

Justifie ton choix.....

Con: la quantité de matière du Fe₂O₃ est 4
 $\frac{5+3}{2} = 4 \text{ mol}$

Figure 20: Réponse d'un apprenant de la classe de 3^{ième} à la neuvième question

Pour trouver la quantité de matière de produit formée, il se retrouve à faire le rapport de la somme des quantités de matière initiales de réactifs par le coefficient stœchiométrique du produit. Bien qu'étant en Tle, il n'a pas construit de signification pertinente de la relation mole à mole entre réactifs et produits.

17,15% des élèves soit 15,24% des élèves de la classe de 3^{ième}, 30,00% des élèves de 2^{nde}, 19,64% des élèves de la classe de 1^{ière} et 5,26% des élèves de la classe de Tle pensent que la quantité de matière d'oxyde de fer (III) formée sera égale à son coefficient stœchiométrique. Ils trainent la conception identifiée à la question précédente selon laquelle le coefficient stœchiométrique représente une quantité de matière. On comprend donc, plus généralement que, pour certains apprenants, le coefficient stœchiométrique d'un réactif représente sa quantité de matière initiale et celui d'un produit sa quantité de matière formée une fois la réaction terminée. Ceci quelle que soit la nature du mélange.

Un plus grand pourcentage (34,67%) pense que la quantité de matière d'oxyde de fer formée vaut 1,5 mol. Nous aurions l'illusion de penser que tous sont capables de déterminer la quantité de matière d'un produit formé partant d'un mélange non stœchiométrique. Pourtant, dans ce

cas aussi, des sous catégories peuvent se présenter. Primo, nous avons des élèves qui optent pour cette proposition au hasard et justifient leur réponse par : « *parceque c'est la bonne réponse* », « *parceque c'est ce que je trouve avec mon imagination* », ...ou même ne se justifient pas. Secundo, des personnes qui adoptent un chemin que nous avons du mal à expliquer. Notons que ce raisonnement s'est retrouvé plusieurs fois en classe de 3^{ième} :

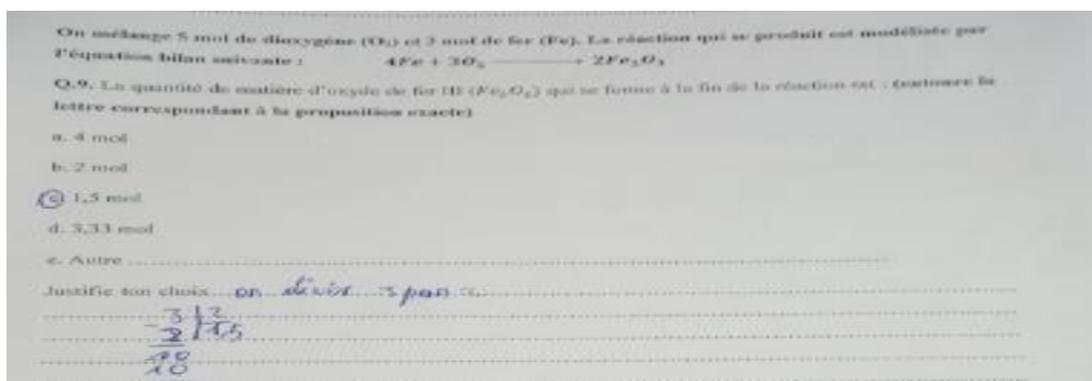


Figure 21: détermination de la quantité de matière d'oxyde fer (III) par un élève

La question qui se pose est de savoir pourquoi 3 et 2 ? S'agit-il des coefficients stœchiométriques et de l'indice du dioxygène respectivement ? De la quantité de matière initiale de fer et de l'indice du fer dans l'oxyde de fer ? L'auteur lui-même n'a rien pu nous dire. Nous pensons donc qu'il s'est contenté de partir des chiffres du libellé pour obtenir l'une des propositions.

Pour ceux de cette catégorie qui appliquent la relation mole à mole entre fer et l'oxyde fer (III), nous pensons qu'ils ont spontanément utilisé le premier réactif de l'équation. Par un coup de chance, elle a donc pu trouver « bonne » réponse. Ce qui nous laisse voir que la notion de réactif limitant ne fait pas encore partie du registre de connaissances de ces élèves en chimie ou plus précisément, ils ne savent pas déterminer la quantité de matière d'un produit à partir d'un mélange non stœchiométrique.

10,55% de notre échantillon trouve que la quantité de matière de fer formée vaudra 3,33 mol. Ils ont donc appliqué la relation mole à mole entre le réactif en excès et le produit. Ils semblent en effet avoir choisi comme réactif celui dont la quantité de matière a été donnée en premier dans le libellé. La détermination du réactif limitant ne constitue pas encore un impératif pour ces apprenants.

Seuls 1,68% des élèves soit 0,00% des élèves de la classe de 3^{ième}, 2,56% des élèves de 2^{nde}, 1,79% des élèves de la classe de 1^{ière} et 5,76% de la classe de Tle pensent à déterminer le réactif

limitant. Ils ont donc conscience de la nécessité de déterminer le réactif limitant lorsqu'on se trouve face à un mélange non stœchiométrique avant de chercher à déterminer la quantité de matière de produit qui se forme.

5.1.6.3. Détermination du nombre de molécules à partir de la quantité de matière

Q.10. Le nombre de molécules d'oxyde de fer III (Fe_2O_3) formé est : (entoure la lettre correspondant à la proposition exacte)

- a. 3 molécules
- b. 2 molécules
- c. 1,5 molécule
- d. $1,91 \times 10^{23}$ molécules
- e. Autre

Tableau 12: fréquences des différentes catégories de réponses des apprenants à la dixième question

Enoncé de la catégorie	Fréquences				Total général
	3 ^{ème}	2 ^{de}	1 ^{ère}	Tle	
a	20,00%	10,00%	7,14%	7,89%	13,39%
b	30,48%	62,50%	48,21%	60,53%	44,77%
bonne réponse	3,81%	2,50%	5,36%	10,53%	5,02%
c	9,52%	7,50%	7,14%	7,89%	8,37%
c,d	0,00%	0,00%	1,79%	0,00%	0,42%
d	9,52%	2,50%	14,29%	2,63%	8,37%
e	2,86%	0,00%	3,57%	2,63%	2,51%
pas de réponse	23,81%	15,00%	12,50%	7,89%	17,15%
Total général	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%

Comme mentionné dans l'analyse a priori, aucune des propositions faites dans ce cas précis n'est correcte. Ainsi, les élèves de la catégorie « bonne réponse » sont ceux ayant suivi la bonne démarche et abouti au bon résultat. Il s'agit au total de 5,02% des élèves soit 3,81% des élèves de 3^{ème}, 2,50% des apprenants de 2^{de}, 5,36% des élèves de 1^{ère} et 10,53% des élèves de Tle.

Ils sont donc capable de circuler du macroscopique au microscopique pour déterminer la quantité de produit formée à partir d'un mélange non stœchiométrique.

Parmi les 13,39% d'élèves qui pensent qu'il se forme 3 molécules d'oxyde de fer (III) (proposition a), plusieurs justifient leur choix par le « III » que l'on retrouve dans la nomenclature de la molécule. Ce qui montre encore que les élèves prennent tout et n'importe quel nombre comme une quantité de matière ou un nombre de molécules /atomes. Pour d'autres, il s'agit d'une troncature de la valeur de la quantité de matière déterminée à la question précédente. Les élèves ne semblent donc pas faire la différence être le nombre de molécules et la quantité de matière.

Dans le même ordre d'idées, 8,37% optent pour la proposition c, assimilant, comme les précédents, la quantité de matière au nombre de molécules. Nous pouvons penser que les élèves construisent des significations non pertinentes non seulement de la notion de nombre de molécules, mais aussi de nombre d'Avogadro.

44,77% des apprenants soit 30,48% des apprenants de 3^{ième}, 62,50% des apprenants de 2^{nde}, 48,21% des apprenants de 1^{ière} et 60,53% des apprenants de Tle pensent que le nombre de molécules d'oxyde de fer (III) vaut 2 soit le coefficient stœchiométrique. Tout ceci est en accord avec les observations faites plus haut. Une fois de plus, une mauvaise conception semble aller grandissante à mesure que les apprenants avancent dans leur cursus.

8,37% des élèves soit 9,52% des apprenants de 3^{ième}, 2,50% des apprenants de 2^{nde}, 14,29% des apprenants de 1^{ière} et 2,63% des apprenants de Tle optent pour la proposition d sans toutefois pouvoir le justifier. Nous pensons donc que leur choix a été hasardeux ou mieux, guidé par l'idée selon laquelle « généralement dans les exercices le nombre de molécules est assez grand, de l'ordre de 10^{23} ». Ils auraient donc choisi cette proposition pour satisfaire à cette récurrence observée dans les exercices sans pour autant savoir quel est le processus qui y conduit.

Enfin, 2,51% des apprenants optent pour la proposition e avec des justifications généralement non scientifique et 17,59% des apprenants ne donnent aucune réponse. Le pourcentage de non réponses étant le plus élevé en classe de 3^{ième} (23,81%) et diminue à mesure que le niveau augmente.

5.1.7. Loi de conservation de la matière

Q.11. Considérons la réaction chimique symbolisée par l'équation bilan suivante :



On mélange à l'instant initial 2 mol de soufre (S) et 1 mol de dioxygène (O₂). Quelle est la quantité de matière de dioxygène (O₂) restant lorsque 0,25 mol de trioxyde de soufre (SO₃) est formé ?

Tableau 13: fréquences des différentes catégories de réponses des apprenants à la onzième question

Enoncé de la catégorie	Fréquences				Total général
	3 ^{ième}	2 ^{nde}	1 ^{ière}	Tle	
0	0,00%	0,00%	1,79%	0,00%	0,42%
1-0,25	1,90%	2,50%	0,00%	0,00%	1,26%
bonne réponse	0,00%	10,00%	17,86%	13,16%	7,95%
calcul de la quantité de matière ayant réagit	1,90%	22,50%	28,57%	50,00%	19,25%
combinaison des données du libellé	4,76%	2,50%	3,57%	5,26%	4,18%
masse/masse molaire	8,57%	15,00%	1,79%	0,00%	6,69%
non compréhension de la consigne	0,95%	20,00%	8,93%	7,89%	7,11%
autre	3,81%	0,00%	5,36%	5,26%	3,77%
pas de réponse	78,10%	27,50%	32,14%	18,42%	49,37%
Total général	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%

Le tableau ci-dessus nous montre que seuls 7,95% des élèves interrogés soit 0,00% des élèves de 3^{ième}, 10,00% de ceux de 2^{nde}, 17,86% des élèves de 1^{ière} et 13,16% des élèves de Tle réussissent à effectuer la tâche avec succès. Ce qui nous laisse voir que seul ce faible pourcentage a construit des significations suffisamment pertinentes de la conservation de la quantité de matière d'un réactif. Le taux enregistré en classe de 3^{ième} est en droite ligne avec la transposition didactique. En effet, des élèves ne peuvent construire des significations pertinentes d'un concept qu'ils n'ont jamais abordé. Pour les classes de 1^{ière} et Tle, ce genre de tâche se retrouve généralement dans les problèmes d'oxydoréduction et de réactions acido-basiques ainsi, bien que la notion ne soit pas construite, elle est utilisée comme outil pour la résolution de problèmes. C'est sûrement ce facteur d'utilisation d'un outil non construit au préalable qui explique le faible taux de bonnes réponses à cette question dans les classes de 1^{ière} et Tle.

0,42% de l'échantillon pense que la quantité de dioxygène restant est nulle. Le dioxygène étant réactif, cette catégorie d'apprenant ne conçoit pas l'idée que la réaction chimique puisse être continue dans le temps c'est-à-dire se dérouler à une vitesse précise, ce qui s'accompagne d'une formation progressive de produit ou d'une disparition progressive de réactifs. Pour eux, puisque la réaction est totale, une fois que le produit est formé, la quantité de matière de réactif restant est nulle.

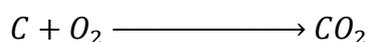
1,26% des apprenants, exclusivement en classes de 3^{ième} et 2^{nde} pensent que la quantité de matière formée est une soustraction de la quantité initiale de dioxygène la quantité de matière de dioxyde de soufre formée. Le terme « restant » rime donc chez eux avec « soustraction » quant aux valeurs à soustraire, ne nous pouvons nous prononcer avec exactitude sur les choix effectués puisqu'ils n'ont pas été justifiés.

19,25% des apprenants soit 1,90% des apprenants de la classe de 3^{ième}, 22,50% des apprenants de 2^{nde}, 28,57% de ceux de la classe de 1^{ière} et 50,00% de ceux de la classe de Tle se limitent au calcul de la masse de dioxygène ayant réagi. Ceci montre qu'ils ont construit des significations non pertinentes de la notion de quantité de matière d'un réactif restant à un instant précis et par ricochet de la notion de conservation de la quantité de matière d'un réactif.

4,18% des élèves sondés font une simple combinaison des données du libellé sans justification scientifique ; 6,69 % des apprenants utilisent le rapport masse sur masse molaire comme ceux de la catégorie précédente, ils n'ont pas construit de significations pertinentes de la conservation de la quantité de matière d'un réactif. Enfin, 7,11% des élèves semblent n'avoir pas compris la consigne puisqu'ils s'attèlent à calculer la masse, le rendement de réaction, la quantité de trioxyde de soufre.

5.1.8. Unité de décompte des particules mises en jeu au cours d'une réaction chimique

Q.12. Considérons la réaction chimique symbolisée par l'équation bilan suivante :



A l'instant initial, on mélange un gramme de carbone (C) et un gramme de dioxygène (O₂). Les réactifs sont-ils dans les proportions stœchiométriques ?

Tableau 14: fréquences des différentes catégories de réponses des apprenants à la douzième question

Enoncé de la catégorie	Fréquences				Total général
	3 ^{ième}	2 ^{nde}	1 ^{ière}	Tle	
non	9,52%	25,00%	37,50%	44,74%	24,27%
oui	41,90%	55,00%	42,86%	36,84%	43,51%
pas de réponse	48,57%	20,00%	19,64%	18,42%	32,22%
Total général	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%

Le tableau 13 ci-dessus nous montre que 24,27% des apprenants soit 9,52% des apprenants de la classe de 3^{ième}, 25,00% de ceux de 2^{nde}, 37,50% de ceux de la classe de 1^{ière}, 44,74% des apprenants de la classe de Tle pensent que les réactifs ne sont pas dans les proportions stœchiométriques. 43,51% à savoir 41,90% des apprenants de 3^{ième}, 55,00% de ceux de 2^{nde}, 42,86% des apprenants de 1^{ière} et 36,84% des apprenants de Tle pensent que les réactifs sont dans les proportions stœchiométriques. Enfin, 32,22% des apprenants soit 48,57% des apprenants de la classe de 3^{ième}, 20,00% de ceux de 2^{nde}, 19,64% de ceux de la classe de 1^{ière} et 18,42% de ceux de Tle pensent ne donnent aucune réponse. Tout ceci, à première vue, nous permet de conclure que la grande majorité des apprenants n'a pas construit de significations pertinentes de la notion de proportions stœchiométriques. Un œil plus attentif jeté aux justifications nous permettra de savoir exactement quelles sont les conceptions des apprenants sur la notion de « proportions stœchiométriques ».

Tableau 15: fréquences des différentes justifications des apprenants à la douzième question

Enoncé de la catégorie	Fréquences				Total général
	3 ^{ième}	2 ^{nde}	1 ^{ière}	Tle	
autre	9,52%	0,00%	5,36%	0,00%	5,44%
coefficients stœchiométriques égaux	6,67%	7,50%	7,14%	0,00%	5,86%
equation équilibrée	9,52%	12,50%	12,50%	10,53%	10,88%
équation non équilibrée	0,95%	0,00%	0,00%	0,00%	0,42%
Loi de Lavoisier non respectée	0,95%	0,00%	0,00%	0,00%	0,42%
Loi de Lavoisier respectée	5,71%	10,00%	5,36%	13,16%	7,53%
masses initiales égales	3,81%	7,50%	1,79%	0,00%	3,35%

pas de justification	58,10%	30,00%	26,79%	21,05%	40,17%
proportions stœchiométriques	0,00%	7,50%	0,00%	0,00%	1,26%
proportions stœchiométriques non respectées	0,00%	2,50%	0,00%	0,00%	0,42%
quantités de matière initiales différentes	0,00%	17,50%	23,21%	44,74%	15,48%
quantités de matière initiales égales	0,00%	2,50%	5,36%	10,53%	3,35%
Rapport quantité de matière initiale sur coefficient stœchiométriques différents	0,00%	0,00%	7,14%	0,00%	1,67%
Réactifs pris dans les proportions stœchiométriques	2,86%	0,00%	5,36%	0,00%	2,51%
réaction	1,90%	2,50%	0,00%	0,00%	1,26%
Total général	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%

Pour plus d'éclaircissements effectuons un croisement des réponses et justifications.

Tableau 16: croisement des réponses et justifications des apprenants à la douzième question

Enoncé de la catégorie	Réponses			Total général
	non	oui	pas de réponse	
coefficients stœchiométriques égaux	1,72%	12,50%	0,00%	5,86%
equation équilibrée	0,00%	25,00%	0,00%	10,88%
équation non équilibrée	1,72%	0,00%	0,00%	0,42%
Loi de Lavoisier non respectée	1,72%	0,00%	0,00%	0,42%
Loi de Lavoisier respectée	0,00%	17,31%	0,00%	7,53%
masses initiales égales	0,00%	7,69%	0,00%	3,35%
proportions stœchiométriques respectées	0,00%	2,88%	0,00%	1,26%
proportions stœchiométriques non respectées	1,72%	0,00%	0,00%	0,42%
quantités de matière initiales différentes	62,07%	0,96%	0,00%	15,48%
quantités de matière initiales égales	0,00%	7,69%	0,00%	3,35%
Rapport quantité de matière initiale sur coefficient stœchiométriques différents	6,90%	0,00%	0,00%	1,67%
Réactifs pris dans les proportions stœchiométriques	1,72%	4,81%	0,00%	2,51%

réaction	1,72%	1,92%	0,00%	1,26%
autre	10,34%	6,73%	0,00%	5,44%
pas de justification	10,34%	12,50%	100,00%	40,17%
Total général	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%

Comme le montre le tableau 15, certaines idées tiennent à la fois pour montrer que les réactifs sont ou pas dans les proportions stœchiométriques. Parlant de la tâche assignée aux élèves, seuls 1,67% des apprenants ont une justification pertinente de leur choix, disant que les réactifs ne sont pas dans les proportions stœchiométriques parce que les rapports de leurs quantités de matières initiales par leurs coefficients stœchiométriques respectifs (facteurs stœchiométriques) sont différents. La proportion d'élèves ayant construit des significations pertinentes de la notion de proportions stœchiométriques est donc très faible. À côté, on compte des apprenants qui se justifient par le fait que les quantités de matière initiales sont différentes. Cette justification, dans notre cas précis n'est pas incorrecte puisque les coefficients stœchiométriques sont unitaires. Seulement, elle ne nous permet pas de déduire avec exactitude quelle est la proportion d'élèves qui pensent que réactifs dans les proportions stœchiométriques rime avec facteurs stœchiométriques égaux.

À présent, intéressons-nous aux significations de « proportions stœchiométriques » chez les apprenants.

5,86% des apprenants pensent que les réactifs sont dans les proportions stœchiométriques si leurs coefficients stœchiométriques sont égaux.

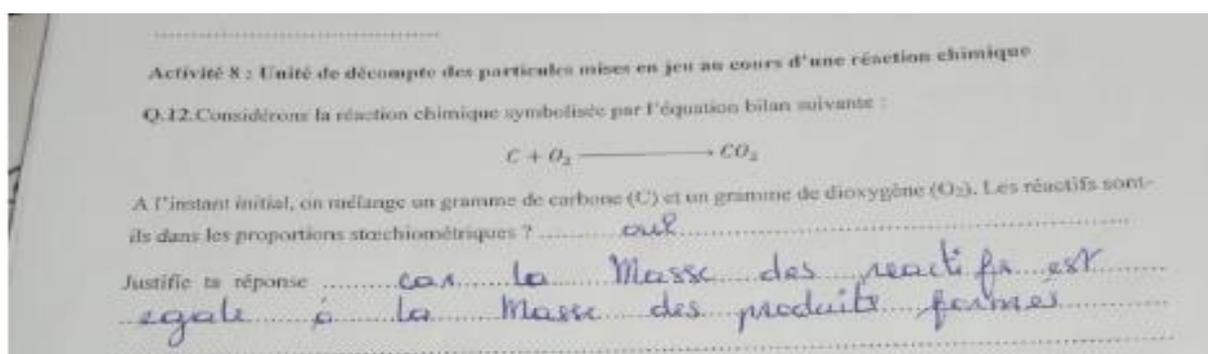
3,35% des apprenants pensent que les réactifs sont dans les proportions stœchiométriques si leurs masses initiales sont égales. Ceux-ci n'ont pas acquis la notion d'unité de décompte de la matière. En effet, au niveau macroscopique, les espèces réagissent non pas en proportions de masse, mais en proportions de quantités de matière.

10,88% pensent que les réactifs sont dans les proportions stœchiométriques parce que l'équation est équilibrée. Dans cette catégorie, certains étayaient leurs propos en mentionnant soit que « *le nombre d'atomes est constant chez les réactifs et chez les produits* », soit que « *les coefficients stœchiométriques sont égaux à la masse* ». Cette dernière affirmation nous permet de mieux cerner les raisons pour lesquelles les apprenants se justifient au moyen de cette idée. En effet, ces élèves continuent de trainer l'idée selon laquelle le coefficient stœchiométrique représente la quantité (quantité de matière, masse, volume,...) initiale de réactif. Ainsi, puisque les masses

de réactifs données se confondent aux coefficients stœchiométriques, ils se font donc l'idée selon laquelle les réactifs sont dans les proportions stœchiométriques parce que les valeurs de leurs masses initiales, au niveau symbolique permettent d'équilibrer l'équation bilan de la réaction correspondante.

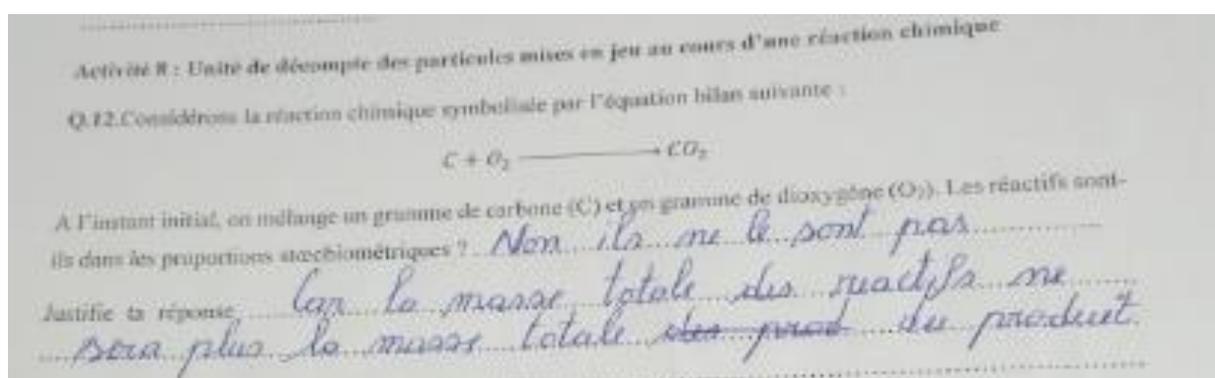
7,53% des apprenants pensent que les réactifs sont dans les proportions stœchiométriques si la loi de Lavoisier est respectée. Nous avons plusieurs cas de figures :

Figure 22 : réponse d'un apprenant de la classe de 3^{ème} à la douzième question



Mentionnant que dans le même ordre d'idées, certains apprenants se justifient en déclarant que « le nombre de masse des réactifs est égal au nombre de masse des produits » assimilant la masse au nombre de masse. Ces élèves pensent que la dite loi peut s'appliquer dans certains cas et pas dans d'autres. Pourtant, dans leurs notes de cours, il est mentionné « au cours d'une réaction chimique, la masse de réactif consommé est égale à la masse de produit formé » preuve que toutes les réactions chimiques suivent ladite loi, ce qu'ils n'ont pas compris.

Figure 23: réponse d'un apprenant de la classe de 3^{ème} à la douzième question



L'apprenant dont la production est représentée ci-dessus mérite un peu plus d'attention. En réalité il semble, parce que les coefficients stœchiométriques sont unitaires, prendre 1g comme masse de dioxyde de carbone formée. Ce cas de figure où les masses initiales sont égales au

coefficient stœchiométrique du composé dans l'équation, fait naître chez les apprenants une conception encore plus erronée du coefficient stœchiométrique : celle de masse du produit formée.

Une certaine catégorie d'élèves (4,81%) se justifient en reprennent « proportions stœchiométriques ». ils restent piégés dans une boucle langagière sans accorder de signification réelle. Un apprenant de cette catégorie affirme : « les réactifs sont dans les proportions stœchiométriques puisque lors du mélange les deux corps sont proportionnels à la stœchiométrie ». Celui-ci ne s'est pas fait une idée pertinente de la notion de proportions stœchiométriques.

5.1.9. Niveau de représentation de la réaction chimique chez les apprenants

Q.13. Comment expliques-tu la formation des produits à la suite d'une réaction chimique ?

Tableau 17: fréquences des différentes catégories de réponses des élèves à la treizième question:

Enoncé de la catégorie	Classe				Total général
	3ième	2nde	1ière	Tle	
addition/mélange/association de réactifs	5,77%	0,00%	10,71%	5,26%	5,93%
affinité/ interaction/attraction	0,00%	2,63%	7,14%	5,26%	2,97%
changement de forme	0,96%	0,00%	0,00%	0,00%	0,42%
combinaison des atomes	0,00%	0,00%	3,57%	0,00%	0,85%
disparition des corps purs et apparition de nouveaux	14,42%	5,26%	3,57%	13,16%	10,17%
Exemple typique de réaction	6,73%	21,05%	12,50%	2,63%	9,75%
formation des liaisons hydrogène	0,00%	0,00%	0,00%	5,26%	0,85%
le produit regroupe les réactifs	0,96%	0,00%	0,00%	0,00%	0,42%
les réactifs réagissent/ les produits sont formés	0,96%	2,63%	12,50%	0,00%	3,81%
loi de Lavoisier	15,38%	15,79%	8,93%	13,16%	13,56%
présence de catalyseurs déclencheurs de réaction	0,00%	2,63%	1,79%	2,63%	1,27%
rupture de liaisons et formation de nouvelles	0,00%	0,00%	3,57%	0,00%	0,85%

selon les proportions stœchiométriques	0,96%	2,63%	1,79%	0,00%	1,27%
transformation/ réaction chimique	3,85%	5,26%	10,71%	13,16%	7,20%
autre	0,96%	10,53%	3,57%	0,00%	2,97%
pas de réponse	49,04%	31,58%	19,64%	39,47%	37,71%
Total général	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%

37,71% des apprenants interrogés soit 49,04% des apprenants de la classe de 3^{ième}, 31,58% des apprenants de la classe de 2^{nde}, 19,64% de ceux de 1^{ière} et 39,47% des apprenants de la classe de Tle ont des difficultés à expliquer la formation des produits à la suite d'une réaction chimique.

10,17% des apprenants soit 14,42% des apprenants de 3^{ième}, 5,26% des apprenants de 2^{nde}, 3,57% de ceux de 1^{ière} et 13,16% de ceux de Tle pensent que les produits sont formés à la suite d'une disparition des corps purs et apparition des nouveaux. Ils rappellent ici la définition de la réaction chimique telle que construite en classe de 4^{ième} qu'ils continuent de trainer au niveau où ils se trouvent. Leur perception de la réaction chimique reste empirique, et formulée au niveau macroscopique (Dumon & Laugier, 2004). C'est tout de même curieux de constater que le taux d'apparition de cette catégorie est bien plus élevé en Tle qu'en 1^{ière} pourtant les apprenants de Tle, abordent déjà la notion de temps pour caractériser la réaction chimique (cinétique chimique) ce qui les oblige à regarder la réaction chimie au niveau microscopique.

0,42% des apprenants attribuent la formation des produits à un changement de forme et d'état des réactifs. Cette idée bien que ne se retrouvant qu'en classe de 3^{ième} et en taux faible, nous a paru digne d'analyse. En effet, elle montre que la réaction chimique reste perçue au niveau macroscopique, mais cet apprenant risque fort de tomber dans la confusion entre transformation physique et transformation chimique. il semble n'avoir pas compris que le « changement » ou le processus « d'apparition et de disparition » de substances évoqué par ses camarades cités plus haut se voit en termes de changement de propriétés chimiques lesquelles ne sont pas toujours perçues grâce à la forme ou à l'état physique.

13,56% des apprenants donnent une explication fondée sur la loi de Lavoisier. C'est le cas de l'apprenant ci-dessous :

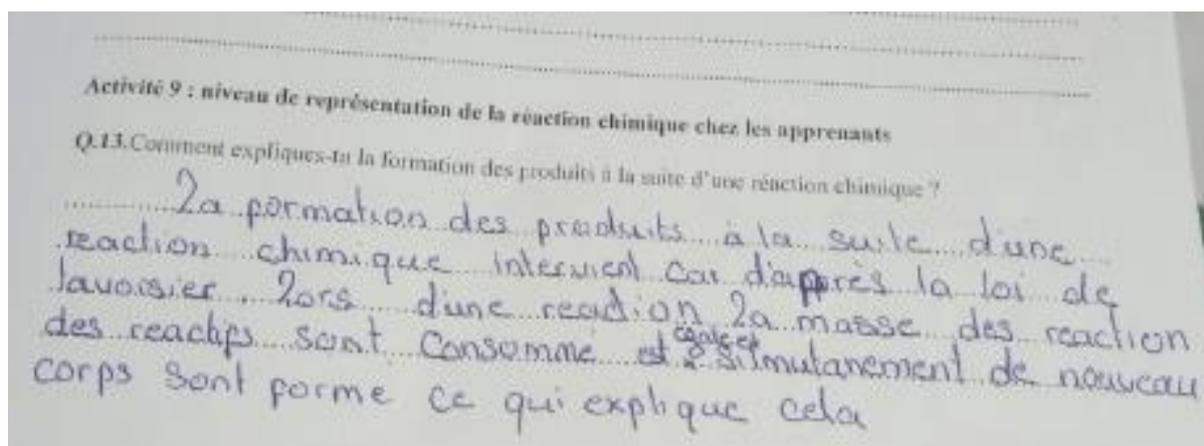


Figure 24: proposition de réponse d'un élève à la treizième question

En d'autres termes les produits sont formés parce qu'il y a consommation des réactifs. Le terme consommation ici peut être vu comme un synonyme au terme disparition. Leur perception de la réaction chimique n'est donc pas bien éloignée de celle de leurs camarades précédents.

5,93% des élèves sondés soit 5,77% des apprenants de la classe de 3^{ième}, 0,00% de ceux de 2^{nde}, 10,71% de ceux de 1^{ière} et 5,26% de ceux de Tle expliquent la réaction chimique par le mélange, la combinaison ou alors l'addition des réactifs. Cette conception a été trouvée plus tôt par Dehon et Snauwaert (2015). Le verbe « additionner » fait montre d'une conception de la réaction chimique comme simple juxtaposition des substances étayant ainsi la difficulté des élèves à cerner la réaction chimique. A côté, 3,81% des apprenants soit 0,96% en 3^{ième}, 2,63% des apprenants de 2^{nde}, et 12,50% en 1^{ière} restent dans une boucle langagière affirmant que « *les réactifs réagissent* ». Ils voient donc la réaction chimique au niveau symbolique et le taux élevé rencontré en classe de 1^{ière} suscite tout de même des interrogations.

1,27% des élèves expliquent la réaction chimique par la présence de catalyseurs. Il s'agit en particulier de 2,63% des apprenants de 2^{nde}, 1,70% des apprenants de 1^{ière} et 2,63% des apprenants de Tle. Ces apprenants

0,88% des apprenants expliquent la réaction chimique par la formation des liaisons hydrogène. Il s'agit en particulier des apprenants de la classe de Tle, familiarisés, grâce à la chimie organique à cette liaison. Ce qu'ils n'ont sûrement pas compris est que ces types de liaisons sont des interactions entre les molécules qui en elles-mêmes ne font pas naître de composés nouveaux, mais assurent la cohésion des molécules entre elles. Une idée est tout de même intéressante à relever : les élèves savent que la formation de corps nouveau est, au niveau microscopique lié aux liaisons chimiques.

9,75% des apprenants expliquent la formation des produits en évoquant des réactions chimiques particulières. Il s'agit de 6,73% des apprenants de 3^{ième}, 21,05% des apprenants de 2^{nde}, 12,50% des apprenants de 1^{ière} et 2,63% des apprenants de Tle. Plus précisément, les apprenants de 3^{ième} et 2^{nde} expliquent la formation des produits par la « combustion ». Pour eux, il y a combustion des réactifs selon la loi de Lavoisier pour que les produits puissent se former. Les apprenants de 1^{ière} et Tle à leur tour évoquent respectivement le transfert d'électrons et le transfert de protons faisant ainsi allusion respectivement aux réactions d'oxydoréduction et aux réactions acido-basiques, réactions qui occupent une place de choix dans leur programme de chimie. Ce qui nous permet de comprendre que les apprenants n'ont pas une idée précise de la réaction chimique, mais assimilent des exemples typiques de réactions qu'ils abordent en fonction du niveau où ils se trouvent à la réaction chimique en général.

0,85% des apprenants, exclusivement en classe de 1^{ière} évoquent la combinaison des atomes comme explication de la formation des produits à la suite d'une réaction chimique. Cette représentation, pertinente de la réaction chimique, se trouve au niveau atomico-moléculaire (Dumon & Laugier, 2004).

Enfin, 0,85% des apprenants exclusivement en classe de 1^{ière} cette fois encore évoquent, comme explication de la formation des produits la suite d'une réaction chimique, la rupture des liaisons et formation de nouvelles liaisons. Cette représentation pertinente de la réaction chimique se trouve au niveau microscopique (Dehon, 2018; Dehon & Snauwaert, 2015; Dumon & Laugier, 2004).

5.2. Discussion

L'analyse des tests permet de mettre en lumière plusieurs constats.

D'abord, l'opération d'équilibrage des équations bilan de réaction ne pose pas suffisamment de problèmes aux apprenants. A mesure qu'ils avancent dans leur cursus, ils développent des aptitudes à le faire. Seulement, le contrat didactique tel que négocié par les enseignants les oblige souvent à utiliser des coefficients qui eux ne présentent pas les proportions les plus simples. De ce fait, le sens de coefficient stœchiométrique comme « proportion » perd toute sa légitimité. Les coefficients stœchiométriques, lorsqu'ils sont sous forme de fraction sont certes significatifs aux niveaux macroscopiques et symboliques, mais restent non pertinentes au niveau microscopique. A titre d'exemple, il n'est pas possible d'avoir une demi-molécule de dichlore ou de dihydrogène. Comme le mentionne Dehon (2018), équilibrer une équation bilan de réaction n'est pas synonyme de construction de significations pertinentes des informations

véhiculées par ladite équation bilan. Pour la suite, nous allons donc discuter des significations construites par les apprenants sur les autres concepts du réseau conceptuel de la stœchiométrie.

La question de composition constante des composés n'est pas très abordée dans la littérature. Mais, cette notion, faisant partie du réseau conceptuel de notre concept objet d'étude, demande une forte attention de notre part. En particulier, bon nombre d'apprenants n'en sont pas conscients. La tendance est plutôt, chez les élèves, de mettre en avant le désir de conserver les éléments plutôt que conserver l'identité des composés.

Le rôle joué par des chiffres comme le coefficient stœchiométrique ou l'indice est également la cause d'interprétations diverses, principalement celle d'un rapprochement forcé avec des procédures calculatoires (Dehon & Snauwaert, 2015). Par exemple, le coefficient stœchiométrique est lié, pour certains élèves, à la seule démarche de pondération, dont il constitue le résultat « mathématique ». Aussi, il représente, la quantité de matière initiale de réactif, la quantité de matière de produit formé ou même le nombre de molécules /atomes de produit formé. Cette idée, erronée, va curieusement grandissante à mesure que le niveau des apprenants s'élève. Par ailleurs, lorsque les élèves sont placés devant un item de type QCM, ils optent majoritairement pour la signification pertinente du coefficient stœchiométrique au niveau microscopique. C'est ce qui montre le caractère variable des conceptions des apprenants en fonction de la situation dans laquelle se trouve l'élève. Le coefficient stœchiométrique est ainsi ancré au carrefour des trois niveaux de signification (Mzoughi-Khadhraoui & Dumon, 2012) et peut de ce fait générer des significations très différentes : nombre de particules (molécules, atomes, ions), quantité de matière de réactif ou de produit, proportion, etc.

Loi de Lavoisier est formulée dès la classe de 3^{ème} dans le but de les informer de l'égalité des masses de réactifs ayant réagi et la masse de produits formés. Cette loi est par la suite déclinée au niveau microscopique en termes de conservation des éléments. Nous nous apercevons que les élèves, en grande partie, construisent des significations u niveau symbolique de cette loi. Ils développent des idées selon lesquelles les éléments présents dans les produits sont des produits d'une réaction chimique, viennent des produits en eux-mêmes, ou vaguement des réactifs sans pouvoir préciser exactement de quel réactif il s'agit.

Une des notions couramment évoquée en chimie quantitative est celle de mélange stœchiométrique. Nous avons sondé les significations des apprenants sur cette notion tant au niveau macroscopique qu'au niveau microscopique. Au niveau macroscopique, les élèves sont de plus en plus (à mesure que le niveau d'étude augmente) capables de déterminer la quantité

de matière de réactif nécessaire à la réaction avec une quantité donnée d'un autre réactif. En classe de 3^{ième}, la faible construction de l'exploitation d'une équation bilan de réaction en situation de classe les rend quasi incapables d'effectuer une telle tâche. A partir de la classe de 2^{nde}, bien que la notion d'exploitation d'une équation bilan de réaction ne soit plus reconstruite, les apprenants sont de plus en plus sujets aux exercices leur demandant d'effectuer cette tâche. Bien plus, la réalisation de ladite tâche demande une bonne conceptualisation non seulement de la notion de quantité de matière, mais de la relation de proportionnalité entre les quantités de réactifs et de produits qui réagissent cette dernière étant pleinement liée aux coefficients stœchiométriques. En classe de 3^{ième}, la relation donnant la quantité de matière d'une espèce reste construite au niveau symbolique. Les significations évoluent à mesure que les apprenants évoluent dans leur cursus.

Réaliser la tâche précédemment présentée au niveau microscopique demande une construction de significations pertinentes de la relation de proportionnalité entre le nombre de molécules/atomes de réactifs qui réagissent. Le faible taux de bonnes réponses à cette question (Q.6) montre une faible construction de signification de la notion de proportions stœchiométriques au niveau microscopique. En revanche, les apprenants préfèrent manipuler l'équation bilan en la « multipliant » pour résoudre ce problème.

Les deux observations ci-dessus présentées nous font corroborer à cette pensée de Frazer et Servant (1986) : « *Ecrire correctement une équation bilan de réaction et en interpréter correctement les coefficients stœchiométriques représente la base du succès dans la résolution des problèmes* »(Frazer & Servant, 1986) cité par (Gauchon & Méheut, 2007).

Lorsque le mélange n'est pas stœchiométrique, un des réactif est appelé réactif limitant. Nous nous sommes intéressés aux significations que les élèves prêtent à ce concept. Nous nous sommes rendu compte que les apprenants n'ont majoritairement pas construit de significations pertinentes de cette notion. En classe de 3^{ième}, aucun élève ne pense à déterminer le réactif limitant lorsqu'il se retrouve face à un mélange non stœchiométrique avant de déterminer la quantité de matière de produit formé. A partir de 2^{nde}, les apprenants y pensent, mais en taux très faible.

La quantité de matière d'un composé est un indice au niveau macroscopique. Il est possible de passer au niveau macroscopique dans le but de déterminer, une fois encore, la quantité de ce composé présent dans un milieu. Cette fois-là, on s'intéresse au nombre d'atomes ou de molécules. Ce passage se fait via l'usage du nombre d'Avogadro. Les élèves ont construit des

significations très peu pertinentes de cette notion. Pour eux, nombre de molécules rime avec coefficient stœchiométrique. Cependant, les bonnes conceptualisations du nombre d'Avogadro augmentent à mesure que le niveau augmente. A l'exception de la classe de 2nde.

La réaction chimique est un processus continu ce qui implique une consommation progressive des réactifs mis en jeu. De ce fait, une fois familiarisé à la notion de réaction chimique et à son analyse quantitative, un apprenant doit conceptualiser la conservation de la quantité de matière d'un réactif. Nos résultats montrent que cette notion n'apparaît pas dans la transposition didactique du concept de stœchiométrie en classe de 3^{ième}, ce qui justifie clairement l'incapacité des apprenants de ladite classe à l'appliquer. A partir de la classe de 2nde, cette loi est utilisée comme outil de résolution des problèmes.

La notion de proportions stœchiométrique revêt des significations généralement non pertinentes chez les apprenants. Pendant que certains s'appuient sur l'égalité des coefficients stœchiométriques, d'autres s'appuient sur la loi de Lavoisier, d'autres encore trouvent que les masses données correspondent aux coefficients stœchiométriques et donc permettront d'équilibrer l'équation bilan et enfin, certains se basent sur l'égalité des masses. Ces derniers n'ont pas construit la notion d'unité de décompte de la matière, en référence à cette question trouvée dans la littérature : « *Comment compter les ions en solution ?* » (Laugier & Dumon, 2004).

Pour terminer, l'équation bilan de réaction reste, même pour des élèves en classe de Tle, une inconnue. En effet, on compte pas moins de dix catégories de réponses des apprenants à la question de savoir comment les produits arrivent à se former à partir des réactifs. Plus particulièrement, les représentations de la réaction chimique au niveau microscopique sont marginales : seulement 4 élèves sur 239 ; tous se retrouvant en classe de 1^{ière} font référence aux liaisons ou aux atomes. En conséquence, les élèves ne peuvent produire qu'une explication pauvre du processus réactionnel, limités par une boucle langagière (les réactifs réagissent), une explicitation des réactions qui leurs sont familières (il y a combustion des réactifs, échange d'électrons, échange de protons, oxydation), des balbutiements de la loi de Lavoisier, des observations macroscopiques (il y a disparition des corps et apparition de nouveaux corps) et des verbes peu précis (les réactifs s'assemblent), voire incorrects (les réactifs s'additionnent). L'absence de représentations au niveau microscopique peut donc avoir des conséquences importantes sur la conceptualisation de la réaction chimique, comme défendu par certains auteurs.

Cependant, l'utilisation des seules productions écrites ne peut nous permettre de statuer sur les connaissances réelles ou les capacités des élèves. En effet, on ne peut nier la difficulté d'interpréter le sens que les étudiants prêtent à certains termes, leur expression écrite ne rendant peut-être pas compte de la représentation mentale qu'ils ont construite (Laugier & Dumon, 2000 ; Johnson, 2000).

5.3. Suggestions

Examiner les conceptions des élèves sur la stœchiométrie donnera à l'enseignant des points de départ pour son cours. En effet, l'APC s'adosse sur un cadre socioconstructiviste qui veut que les leçons débutent par des situations problèmes porteuses d'obstacles. Ces obstacles se voient grâce aux conceptions erronées des apprenants. De plus, une analyse des programmes et livres au programme permettra de les améliorer et par là-même donner aux enseignants un outil de qualité sur lequel s'appuyer pour préparer leurs leçons.

Nous formulons donc quelques recommandations :

Au niveau des programmes, présenter la stœchiométrie dans les programmes comme un objet d'étude à part entière. En effet, selon Johnstone (2010),

*Les difficultés liées à la compréhension des transformations chimiques sont dues aux spécifications du curriculum et en particulier à l'échec de travailler exactement avec les concepts clés. Le curriculum ne présente pas directement les idées clés dont les élèves ne disposent pas ou doivent développer pour comprendre le contenu de la chimie.*¹⁸ (Johnstone, 2010).

Au niveau de l'enseignant :

- Arrêter d'enseigner mathématiquement la stœchiométrie en privilégiant une construction des significations pertinentes des concepts y afférent ;
- Varier les situations permettant d'enseigner un concept afin d'éviter l'assimilation des cas particuliers aux règles. Exemple: les proportions stœchiométriques ;
- Partir des conceptions des apprenants sur le concept de stœchiométrie pour mettre sur pied des situations problèmes pertinentes et porteuses d'obstacles.

¹⁸ The difficulties in understanding chemical changes are due to the specification of the curriculum, and in particular to failure to deal properly with the relevant concepts. The curriculum does not directly address key ideas that students do not have and need to develop in order to understand chemistry content. (Traduction libre de (Johnstone, 2010) cité par Stamovlasis et al. 2005)

Conclusion et perspectives

Dans ce travail nous avons déterminé les conceptions des apprenants des classes de 3^{ième} en Tle de l'enseignement secondaire général Camerounais sur le concept de stœchiométrie. Nous traitons en effet sur les difficultés des élèves et même des étudiants à résoudre des problèmes de stœchiométrie en nous appuyant sur la théorie des niveaux de significations de Dehon (2018).

Nous avons effectué une double analyse épistémologique et didactique du concept de stœchiométrie. L'analyse épistémologique nous a premièrement permis de déterminer les concepts du réseau conceptuel de la stœchiométrie et deuxièmement, en termes de niveaux de savoir, nous a guidé vers l'identification de trois niveaux de significations dans lesquels pourraient se trouver tout savoir formulé dans le cadre de l'enseignement et l'apprentissage des concepts de chimie et en particulier ceux du réseau conceptuel de la stœchiométrie. Précisément, il s'agit des niveaux macroscopique, microscopique et symbolique (Dehon, 2018). L'analyse didactique a montré dans quelle mesure les objectifs visés par les concepteurs de programmes sont traduits dans le manuel scolaire en termes de contenus. Nous avons interrogé l'impact de cette transposition non seulement sur les logiques disciplinaires véhiculées par les apprenants, mais surtout sur les significations que les apprenants prêtent aux différents concepts du réseau conceptuel de la stœchiométrie.

Il en ressort que la structure prescrite par le curriculum officiel en ce qui concerne l'enseignement de la « notion de réaction chimique » est respectée par le manuel officiel de la classe de 3^{ième}. Les objectifs assignés à cette séquence d'apprentissage sont conformes aux prescriptions officielles. Ledit manuel comporte un nombre important d'activités, donnant à l'enseignant des indices pour ses choix pédagogiques. Seulement, bon nombre de ces activités favorisent la simple construction symbolique des concepts exposés.

Pour atteindre les significations que les apprenants des classes de 3^{ième} en Tle prêtent aux différents concepts du réseau conceptuel de la stœchiométrie, nous avons soumis à un total de 239 élèves ayant déjà reçu un enseignement sur la notion de réaction chimique un questionnaire papier-crayon. Nous nous sommes aperçus que un total de 80,75% des apprenants soit 68,67% des apprenants de la classe de 3^{ième}, 82,5% de ceux de la classe de 2^{nde}, 91,05 de ceux de 1^{ière}, 97,37% de ceux de Tle parviennent à équilibrer les équations bilan de réaction lorsqu'elles sont simples contre 65,70% respectivement 49, 52%, 70,00%, 83,94% et 78,94% en 3^{ième}, 2^{nde}, 1^{ière} et Tle une fois que l'équation devient un peu plus complexe.

En outre, 50,63% des apprenants soit 41,90% des apprenants de 3^{ème}, 37,50% des apprenants de 2^{ème}, 64,29% de ceux de 1^{ère}, 68,42% de ceux de Tle parviennent à déduire, à partir du récit d'une expérience et de la symbolique des composés engagés, l'équation bilan équilibrée d'une réaction chimique. Certains parmi eux comprennent l'idée de composition constante des composés et d'autres se contentent de signifier qu'il s'agit du résultat qu'ils obtiennent après calcul. Ceux-là restent donc au niveau symbolique.

30,96 % de l'échantillon soit 21,90% des apprenants de la classe 3^{ème}, 40,00% de ceux 2^{ème}, 35,71% de ceux 1^{ère}, 39,47% de ceux Tle assimile la quantité de matière initiale d'un réactif à son coefficient stœchiométrique dans l'équation de la réaction. Ils ont donc une signification erronée de ce concept. Le taux d'apparition de cette idée erronée est croissant avec le niveau de l'élève. 12,55% de l'échantillon, après avoir déduit l'équation bilan de réaction correspondant à un énoncé, ne pense pas à l'équilibrer, se contentant de placer correctement les réactifs et produits aux bons endroits. Ils font montre d'une insuffisance de construction de la conservation des atomes au cours d'une réaction chimique.

Lorsqu'il est question de déterminer l'origine des éléments rencontrés dans les produits de la combustion d'un corps, 9,62% des élèves se contente de juxtaposer des termes de l'énoncé pour construire leur proposition de réponse. Ce qui montre qu'ils restent au niveau symbolique. Seuls 11,30% répondent correctement à la question.

Lorsqu'il s'agit de déterminer, au niveau macroscopique la quantité de matière de réactif nécessaire à la réaction complète avec une quantité donnée d'un autre réactif, 20,08% pensent à la relation liant la quantité de matière d'un composé à sa masse et à sa masse molaire. Seulement, ils tendent à considérer la quantité de réactif donnée comme une masse et attribuer des valeurs souvent sans fondement scientifique à la quantité de matière ce qui montre que les élèves prêtent des significations non-pertinentes au concept de mole et leur maîtrise de la relation susmentionnée reste au niveau symbolique. 2,51 % sont capables d'effectuer la même tâche cette fois ci au niveau microscopique. Ce qui montre les significations que les élèves prêtent, pour ceux qui la connaissent, à la relation mole à mole être les réactifs restent au niveau macroscopique. 36,82% des élèves sont capables de déterminer la quantité de matière d'un produit à partir de la quantité de matière d'un réactif.

Le concept de coefficient stœchiométrique se retrouve au carrefour des trois niveaux de signification (Dehon & Snauwaert, 2015). Par ailleurs, les élèves testés ne pensent pas du tout à vérifier que les réactifs soient dans les proportions stœchiométriques avant de déterminer la

quantité de matière de produit qui se formera au out de la réaction. Nous pouvons sous-entendre que la notion de réactif limitant reste non ou mal construite. Lorsqu'il s'agit de passer du macroscopique au microscopique c'est-à-dire de la quantité de matière d'un produit à son nombre de molécules, seuls 4 élèves sur 105 font recours au nombre d'Avogadro ce qui montre à suffisance que les élèves de 3^{ième} n'arrivent pas à circuler entre les registres macroscopique et microscopique.

Bien plus, comme nous l'avions soupçonné au regard de la transposition didactique de la loi de conservation de la matière dans le manuel officiel, les élèves de 3^{ième} sondés n'arrivent guère à déterminer la quantité de matière se trouvant dans le milieu à un instant où une certaine quantité de produit est formée. Les élèves ne peuvent que construire des significations erronées d'un concept qu'ils n'ont pas abordé. 7,95% de bonnes réponses sont enregistrées dans les niveaux supérieurs ce qui montre, même dans ces cas, une mauvaise conceptualisation de la loi de conservation de la matière appliquée à un réactif.

Plus encore, 43,51% des élèves testés pensent que les réactifs sont pris dans les proportions stœchiométriques lorsque leurs masses sont égales, que les coefficients stœchiométriques sont égaux ou mieux que les masses sont égales aux coefficients stœchiométriques. Personne d'eux ne pense à comparer les quantités de matière. Ils font donc encore face à ce problème historique de choix de l'unité de décompte des particules mises en jeu au cours d'une réaction chimique. Et font par conséquent montre d'une mise en place de significations non pertinentes de la notion de proportions stœchiométriques.

Enfin, des élèves familiarisés avec la notion d'atomes, continuent de voir la réaction chimique, comme présentée dans le manuel officiel, au niveau macroscopique (Dumon & Laugier, 2004) ce qui explique leur incapacité à justifier la présence de certains éléments chimiques dans les produits d'une réaction par la composition atomique des réactifs. Les formules moléculaires des réactifs et produits sont généralement juxtaposés de part et d'autre d'une flèche pour aboutir à l'équation bilan de la réaction après une activité d'équilibrage. On retrouve donc des élèves principalement bloqués entre le niveau macroscopique et le niveau symbolique sans aucune réelle connexion. Il serait illusoire de penser que des apprenants plongés dans de telles situations puissent construire des significations pertinentes de la stœchiométrie et des concepts de son réseau conceptuel, eux qui nécessitent une circulation consciente entre les registres macroscopiques et microscopiques.

Somme toute, nous admettons avec Arasasingham (2004) que les significations du niveau symbolique sont mobilisées priorité chez les apprenants de 3^{ième} de l'enseignement secondaire général Camerounais. Seulement, ceux-ci sont donc comme au stade de l'initiation à la chimie quantitative et de construction des concepts de base nécessaire à la résolution des problèmes mathématiques en chimie. Or, ce type de problème ne se limite pas en classe de 3^{ième}. Bien au contraire, les situations nécessitant un appel aux connaissances relatives à la stœchiométrie se multiplient à mesure que les élèves avancent dans le cursus de l'enseignement secondaire. A ce sujet, Dehon (2018, p.112) affirme que les significations du niveau symbolique sont supposées s'éteindre rapidement durant le cursus pour laisser place aux significations des niveaux macroscopiques et microscopiques. Dans notre recherche, nous avons montrée qu'en contexte Camerounais, certes, les significations du niveau symboliques s'éteignent progressivement, mais elles évoluent beaucoup plus vers le niveau macroscopique. En particulier, les significations qui évoluent semblent correspondre aux aspects sur lesquels portent majoritairement les évaluations séquentielles. Les significations au niveau symboliques sont très peu développées, empêchant ainsi la bonne circulation des apprenants du niveau macroscopique au niveau microscopique pour pouvoir résoudre, avec le plus d'aisance, les problèmes de stœchiométrie. A la question de savoir pourquoi les apprenants jusqu'en classe de Tle continuent d'avoir des difficultés à résoudre les problèmes de stœchiométrie, nous répondons que les concepts ont, dès la base été construits, majoritairement au niveau symbolique. Par suite, ils se sont familiarisés à eux en les utilisant mécaniquement dans la résolution des problèmes c'est pourquoi, bien que le taux de bonne réponse à la résolution d'exercices soit grand, les significations prêtées aux concepts utilisés restent non pertinentes. Nous avons en perspective, la mise au point d'un dispositif d'enseignement permettant une meilleure construction du concept de stœchiométrie par les élèves de l'enseignement secondaire général Camerounais dès la classe de 3^{ième}.

Bibliographie

- Abric, J. C. (1997). *Pratiques sociales et représentations*,(s/dir) Paris. PUF,.
- Arasasingham, R. D., Taagepera, M., Potter, F., & Lonjers, S. (2004). Using knowledge space theory to assess student understanding of stoichiometry. *Journal of Chemical Education*, 81(10), 1517.
- Arsac, G., Tiberghien, A., Develay, M., & mathématiques, U. de L. 1. I. de recherche pour l'enseignement des. (1989). *La transposition didactique en mathématiques, en physique et en biologie*. Université Claude Bernard.
- Astolfi, J.-P., & Develay, M. (1989). *La didactique des sciences*, Paris, PUF. *Que Sais-Je*.
- Avogadro, A. (1811). Essay on a manner of determining the relative masses of the elementary molecules of bodies, and the proportions in which they enter into these compounds. *Journal de Physique*, 73, 58–76.
- Barlet, R., & Plouin, D. (1994). L'équation-bilan en chimie. Un concept intégrateur source de difficultés persistantes. *Aster: Recherches En Didactique Des Sciences Expérimentales*, 18(1), 27–56.
- Berzelius, J. J. (1814). Essay on the cause of chemical proportions, and on some circumstances relating to them; together with a short and easy method of expressing them. *Ann. Philos*, 3, 51–62.
- Bridges, C. D. (2015). *Experiences teaching stoichiometry to students in grades 10 and 11*. Walden University.
- Bruner, J. S. (1966). *Toward a theory of instruction* (Vol. 59). Harvard University Press.
- CARETTO, J., & VIOVY, R. (1994). Relevé de quelques obstacles épistémologiques dans l'apprentissage du concept de réaction chimique. *Aster*, 18, 11–26.
- Cedran, D. P., da Costa Cedran, J., & Kiouranis, N. M. M. (2022). PANORAMA HISTÓRICO DA CONSTRUÇÃO DO CAMPO CONCEITUAL DA ESTEQUIOMETRIA. *Revista Dynamis*, 28(2), 152–170.
- Chagas, A. P. (2003). Os noventa anos de Les Atomes. *Química Nova Na Escola*, 17, 36–38.
- Chevallard, Y., & Johsua, M.-A. (1985). *La transposition didactique: du savoir savant au*

savoir enseigné. La Pensée Sauvage,.

de Andrade Martins, R., & Martins, L. A.-C. P. (1993). Lavoisier e a conservação da massa. *Química Nova*, 16, 3.

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, développement d'une séquence de leçons en s'appuyant sur un modèle des niveaux de signifi*. Thèse de doctorat, Université de Namur, Namur, Belgique.

Dehon, J., & Snauwaert, P. (2015). L'équation de réaction: une équation à plusieurs inconnues. Étude de productions d'élèves de 16-17 ans (grade 11) en Belgique francophone. *RDST. Recherches En Didactique Des Sciences et Des Technologies*, 12, 209–235.

Ducamp, C., & Rabier, A. (2005). L'avancement de réaction en classe de première scientifique. *4iemes Rencontres Scientifiques de l'ARDIST*.

DUMON, A., & LAUGIER, A. (2004). L'équation de réaction: approche historique et didactique de la modélisation de la transformation chimique. *Bulletin de l'Union Des Physiciens*, 98(866), 1131–1144.

Durkheim, É. (1912). Les formes élémentaires de la vie religieuse: le système totémique en Australie. (*No Title*).

Furió-Mas, C., Azcona, R., & Aranzabal, J. G. (1999). Dificultades conceptuales y epistemológicas del profesorado en la enseñanza de los conceptos de "cantidad de sustancia" y de "mol". *Enseñanza de Las Ciencias. Revista de Investigación y Experiencias Didácticas*, 17(3), 359–376.

Gauchon, L. (2008). *Comprendre les titrages-Représentations d'élèves de première et terminale scientifiques et effets de quelques variables*. Université Paris-Diderot-Paris VII.

Gauchon, L., & Méheut, M. (2007). Learning about stoichiometry: from students' preconceptions to the concept of limiting reactant. *Chemistry Education Research and Practice*, 8(4), 362–375.

Gilbert, J. K., & Treagust, D. F. (2009). Towards a coherent model for macro, submicro and symbolic representations in chemical education. *Multiple Representations in Chemical Education*, 333–350.

- Giordan, A., & De Vecchi, G. (1987). Les origines du savoir. *Des Conceptions Des Apprenants Aux Concepts Scientifiques*. Neuchâtel-Paris: Delachaux et Nestlé.
- Glažar, S. A., & Devetak, I. (2002). Secondary school students' knowledge of stoichiometry. *Acta Chimica Slovenica*, 49(1), 43–53.
- Gonzalez, I. M., & SILVA, J. (2013). As fórmulas químicas literais de Berzelius e a composição dos materiais: uma função sígnica nas aulas de química. *IX Encontro Nacional de Pesquisa Em Educação Em Ciências*.
- Houart, M. (2009). *Etude de la communication pédagogique à l'université à travers les notes et les acquis des étudiants à l'issue du cours magistral de chimie*. UNamur-Université de Namur.
- Jensen, W. B. (2004). The origin of the mole concept. *Journal of Chemical Education*, 81(10), 1409.
- Jodelet, D. (2003). *Les représentations sociales*. Presses universitaires de France.
- Johnstone, A. H. (1982). Macro and microchemistry. In *Chemistry in Britain* (Vol. 18, Issue 6, pp. 409–410). ROYAL SOC CHEMISTRY THOMAS GRAHAM HOUSE, SCIENCE PARK, MILTON ROAD
- Johnstone, A. H. (2000). Teaching of chemistry-logical or psychological? *Chemistry Education Research and Practice*, 1(1), 9–15.
- Johsua, S. (1996). Le concept de transposition didactique n'est-il propre qu'aux mathématiques. *C. Raisky & M. Caillot (Éds) Au-Delà Des Didactiques, Le Didactique. Débats Autour de Concepts Fédérateurs (Bruxelles: De Boeck)*, 37–59.
- Johsua, S., & Dupin, J.-J. (1993). *Introduction à la didactique des sciences et des mathématiques*. Presses universitaires de France,.
- Kermen, I., & Méheut, 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*, 10(1), 24–34.
- Kotz, J. C., Treichel, P., & Weaver, G. C. (2015). *Química geral e reações químicas*. Cengage Learning.
- Laugier, A., & Dumon, A. (2004). Mise en place de situations problèmes pour l'apprentissage

- de la stoechiométrie en classe de seconde: compte rendu d'innovation/A problems situations for the approach of stoichiometry with fifth form's groups: report of innovation. *Didaskalia*, 25(1), 117–141.
- LAUGIER, A., & DUMON, A. (2000). Travaux pratiques en chimie et représentation de la réaction chimique par l'équation-bilan dans les registres macroscopique et microscopique: Une étude en classe de seconde (15-16 ans). *Chemistry Education Research and Practice*, 1(1), 61–75.
- Lavoisier, A. L. (1789). *Traité élémentaire de chimie (Elementary Treatise on Chemistry)*. Paris: Cuchet.
- Lipeles, E. S. (1983). The chemical contributions of Amadeo Avogadro. *Journal of Chemical Education*, 60(2), 127.
- Michałowska-Kaczmarczyk, A. M., Asuero, A. G., & Michałowski, T. (2015). “Why Not Stoichiometry” versus “Stoichiometry—Why Not?” Part I: General Context. *Critical Reviews in Analytical Chemistry*, 45(2), 166–188.
- Moscovici, S. (1989). Des représentations collectives aux représentations sociales: éléments pour une histoire. *Les Représentations Sociales*, 5, 79–103.
- Mzoughi-Khadhraoui, I., & Dumon, A. (2012). L'appropriation par des élèves tunisiens débutants du langage permettant de représenter la réaction chimique. *RDST. Recherches En Didactique Des Sciences et Des Technologies*, 6, 89–118.
- Nakhleh, M. B., & Mitchell, R. C. (1993). *Concept learning versus problem solving: There is a difference*. ACS Publications.
- Nic, M., Hovorka, L., Jirat, J., Kosata, B., & Znamenacek, J. (2005). *IUPAC compendium of chemical terminology-the gold book*. International Union of Pure and Applied Chemistry.
- Nurrenbern, S. C., & Pickering, M. (1987). Concept learning versus problem solving: Is there a difference? *Journal of Chemical Education*, 64(6), 508.
- Orange, C. (2006). Analyse de pratiques et formation des enseignants. Un point de vue didactique. *Recherche et Formation*, 51, 119–131.
- Ostwald, W. (2011). *Grundlinien der anorganischen Chemie (Vol. 21)*. BoD—Books on Demand.

- Özgür, S. (2004). La Transposition Noosphérique Dans Le Système Éducatif Turc: Exemple De La Digestion Humaine. *Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 6(2), 77–97.
- Paideya, V., & Sookrajh, R. (2010). Exploring the use of supplemental instruction: Supporting deep understanding and higher-order thinking in chemistry. *South African Journal of Higher Education*, 24(5), 758–770.
- Perrenoud, P. (1998). La transposition didactique à partir de pratiques: des savoirs aux compétences. *Revue Des Sciences de l'éducation*, 24(3), 487–514.
- Perrenoud, P. (1999). Gestion de l'imprévu, analyse de l'action et construction de compétences. *Éducation Permanente*, 140(3), 123–144.
- Piaget, J. (1975). L'équilibration des structures cognitives, PUF, Paris. *Piaget L'équilibration Des Structures Cognitives 1975*.
- Richter, J. B. (1792). *Anfangsgründe der Stöchiometrie oder Meßkunst chymischer Elemente* (Vol. 1). Korn.
- Robardet, G., & Guillaud, J.-C. (1997). *Éléments de didactique des sciences physiques: de la recherche à la pratique: théories, modèles, conceptions et raisonnement spontané*. Presses universitaires de France.
- Russel, J. B. (1994). *edition 2. Química Geral*. São Paulo. Pearson.
- Shadreck, M., & Enunuwe, O. C. (2018). Recurrent difficulties: Stoichiometry problem-solving. *African Journal of Educational Studies in Mathematics and Sciences*, 14, 25–31.
- Solomonidou, C., & Stavridou, H. (1994). Les transformations des substances, enjeu de l'enseignement de la réaction chimique. *Aster: Recherches En Didactique Des Sciences Expérimentales*, 18(1), 75–95.
- Stamovlasis, D., Tsaparlis, G., Kamilatos, C., Papaoikonomou, D., & Zarotiadou, E. (2005). Conceptual understanding versus algorithmic problem solving: Further evidence from a national chemistry examination. *Chemistry Education Research and Practice*, 6(2), 104–118.
- Szabadvary, F. (1962). The birth of stoichiometry. *Journal of Chemical Education*, 39(5), 267.
- Taber, K. S. (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*, 14(2), 156–168.
- Talanquer, V. (2011). Macro, submicro, and symbolic: The many faces of the chemistry “triplet.” *International Journal of Science Education*, 33(2), 179–195.
- Toussaint, R. M. J. (2002). *Changement conceptuel et apprentissage des sciences: recherches et pratiques*. Outremont, Québec: Éditions Logiques.
- Vergnaud, G. (1990). La teoría de los campos conceptuales. *Recherches En Didactique Des Mathématiques*, 10(2), 3.
- Viennot, L. (1996). *Raisonnement en physique: la part du sens commun*. De Boeck Supérieur.
- Zumdahl, S. S. (2002). *Chemical Principles: Steven S. Zumdahl*. Boston, MA: Houghton Mifflin.

ANNEXE : Questionnaire adressé aux élèves

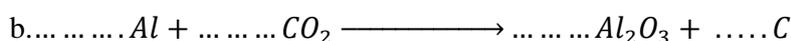
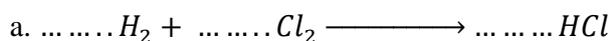
QUESTIONNAIRE

Données :

- Masses molaires en g/mol : $M_C=12$; $M_H=1$; $M_N= 14$; $M_O=16$; $M_S=32$; $M_{Al}=27$; $M_{Cl}=35,5$; $M_{Fe}=56$
- Constante d'Avogadro : $N=6,023 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$

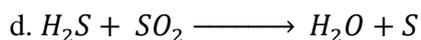
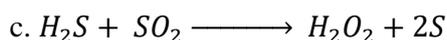
Activité 1 : Equilibrage des équations bilan de réaction

Q.1. Equilibrer les équations bilan suivantes



Activité 2 : Composition constante des composés

Q.2. Le sulfure d'hydrogène (H_2S) réagit avec le dioxyde de soufre (SO_2) pour former l'eau (H_2O) et le soufre (S). L'équation bilan équilibrée de la réaction qui se produit est la suivante : (**entourer la lettre correspondant à la proposition exacte**)



e.

Autre

.....

Justifie ton choix

.....

.....

.....

.....

Activité 3 : Signification du coefficient stœchiométrique

Q.3. On fait réagir trois mol de diazote (N_2) et deux mol de dihydrogène (H_2) pour former de l'ammoniac (NH_3). Ecrire l'équation bilan de la réaction de formation de l'ammoniac.

.....
.....
.....

Activité 4 : conservation des atomes au cours d'une réaction chimique

Q.4. La combustion d'un corps A dans le dioxygène (O₂) de l'air produit du dioxyde de carbone (CO₂) et de l'eau (H₂O). D'où proviennent les éléments carbone et hydrogène présents dans les produits ?

.....
.....
.....
.....

Question 5 : Mélange stœchiométrique et détermination de la quantité de matière de produit formé connaissant la quantité de matière initiale d'un réactif

La réaction du fer avec le dioxygène est modélisée par l'équation bilan suivante :



Q.5. Quelle est la quantité de matière de dioxygène (O₂) nécessaire pour faire réagir complètement 2 mol de fer ?

.....
.....
.....
.....

Q.6. Quel est le nombre de molécules de dioxygène (O₂) nécessaire pour la réaction totale avec huit atomes de fer ?

.....
.....
.....
.....

Q.7. Quelle est la quantité de matière d'oxyde de fer III (Fe₂O₃) formée à partir de deux moles de fer (Fe) ?

.....
.....

.....
.....

Activité 6 : signification du coefficient stœchiométrique et détermination de la quantité de matière d'un produit à partir d'un mélange non stœchiométrique

La réaction du fer avec le dioxygène est modélisée par l'équation bilan suivante :



Q.8. Le chiffre 4 placé devant le symbole « Fe » représente : **(entoure la ou les lettre (s) correspondant à la proposition exacte)**

- a. La quantité de matière de fer (Fe) à l'état initial
- b. Le nombre d'atomes de fer (Fe) nécessaire pour réagir complètement avec 3 molécules de dioxygène (O₂)
- c. Le nombre d'atomes de fer (Fe) à l'état initial
- d. La quantité de matière de fer (Fe) nécessaire pour réagir complètement avec 3 mol de dioxygène (O₂)
- e. Autre

Justifie ton

choix.....
.....
.....
.....

On mélange 5 mol de dioxygène (O₂) et 3 mol de fer (Fe). La réaction qui se produit est modélisée par l'équation bilan suivante :



Q.9. La quantité de matière d'oxyde de fer III (Fe₂O₃) qui se forme à la fin de la réaction est : **(entoure la lettre correspondant à la proposition exacte)**

- a. 4 mol
- b. 2 mol
- c. 1,5 mol
- d. 3,33 mol

e. Autre

Justifie ton

choix.....

.....
.....
.....
.....
.....
.....

Q.10. Le nombre de molécules d'oxyde de fer III (Fe_2O_3) formé est : (entoure la lettre correspondant à la proposition exacte)

a. 3 molécules

b. 2 molécules

c. 1,5 molécules

d. $1,91 \times 10^{23}$ molécules

e. Autre

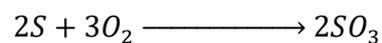
Justifie ton

choix.....

.....
.....
.....

Activité 7 : loi de conservation de la matière

Q.11. Considérons la réaction chimique symbolisée par l'équation bilan suivante :

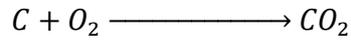


On mélange à l'instant initial 2 mol de soufre (S) et 1 mol de dioxygène (O_2). Quelle est la quantité de matière de dioxygène (O_2) restant lorsque 0,25 mol de trioxyde de soufre (SO_3) est formé ?

.....
.....
.....

.....
.....
Activité 8 : Unité de décompte des particules mises en jeu au cours d'une réaction chimique

Q.12.Considérons la réaction chimique symbolisée par l'équation bilan suivante :



A l'instant initial, on mélange un gramme de carbone (C) et un gramme de dioxygène (O₂). Les réactifs sont-ils dans les proportions stœchiométriques ?

.....
Justifie ta réponse

.....
.....
.....
.....
.....
Activité 9 : niveau de représentation de la réaction chimique chez les apprenants

Q.13.Comment expliques-tu la formation des produits à la suite d'une réaction chimique ?

.....
.....
.....
.....
.....
Identification du répondant :

Nom et prénom:..... Âge :
..... ans

Sexe :..... Classe :..... Série baccalauréat :

