

UNIVERSITÉ DE YAOUNDÉ I

\*\*\*\*\*

FACULTÉ DES SCIENCES DE L'ÉDUCATION

\*\*\*\*\*

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

\*\*\*\*\*

UNITÉ DE RECHERCHE ET DE FORMATION  
DOCTORALE EN SCIENCES DE  
L'ÉDUCATION ET INGÉNIERIE ÉDUCATIVE

\*\*\*\*\*



THE UNIVERSITY OF YAOUNDE I

\*\*\*\*\*

FACULTY OF EDUCATION

\*\*\*\*\*

POST GRADUATE SCHOOL FOR  
SOCIAL AND EDUCATIONAL  
SCIENCES

\*\*\*\*\*

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

\*\*\*\*\*

**Étude de l'impact d'une remédiation impliquant le changement de prévalence conceptuelle sur les difficultés rencontrées dans l'apprentissage du concept de concentration en chimie : cas des élèves des séries scientifiques du Cameroun.**

Thèse en sciences de l'éducation soutenue le jeudi 25 avril 2024

**Spécialité : didactique de la chimie**

par

**Emmanuel MOULIOM NDAM**

devant un jury composé de

**Président** : NKENFACK Augustin, Pr ; Université de Yaoundé I

**Rapporteur** : NTEDE NGA Hippolyte, MC ; Université de Yaoundé I

AYINA BOUNI, MC ; Université de Yaoundé I

**Membres** : MBAZE MEVA'A Luc, Pr ; Université de Douala

MBOUMBOUO NDASSA Ibrahim, MC ; Université de Yaoundé I



Ce document est le fruit d'un long travail approuvé par le jury de soutenance et mis à disposition de l'ensemble de la communauté universitaire élargie.

Il est soumis à la propriété intellectuelle de l'auteur. Ceci implique une obligation de citation et de référencement lors de l'utilisation de ce document.

Par ailleurs, le Centre de Recherche et de Formation Doctorale en Sciences Humaines, Sociales et Educatives de l'Université de Yaoundé I n'entend donner aucune approbation ni improbation aux opinions émises dans cette thèse ; ces opinions doivent être considérées comme propres à leur auteur.

## TABLE DES MATIÈRES

TABLE DES MATIÈRES .....	i
REMERCIEMENTS.....	vi
LISTE DES ABRÉVIATIONS ET DES SIGLES.....	vii
LISTE DES TABLEAUX.....	viii
LISTE DES FIGURES .....	ix
RÉSUMÉ .....	xiii
ABSTRACT.....	xiv
INTRODUCTION GÉNÉRALE .....	1
PARTIE 1 : CADRE THÉORIQUE DE L'ÉTUDE.....	5
CHAPITRE 1 : PROBLÉMATIQUE .....	6
1. Fondements de l'enseignement scientifique et de l'enseignement de la chimie.....	7
1.1. Fondements de l'enseignement scientifique et de l'enseignement de la chimie au Cameroun.....	10
1.2. Rendement des apprenants dans le domaine de la science et dans le domaine de la chimie .....	14
2. Quelles sont les difficultés d'apprentissage de la chimie ?.....	15
2.1. Qu'est-ce que la chimie ? .....	15
2.2. Difficultés d'apprentissage liées aux niveaux de représentation des savoirs chimiques .....	16
2.3. Difficultés d'apprentissage en chimie liées aux conceptions alternatives .....	20
3. Apprentissage du concept de concentration chimique .....	25
3.1. Transposition didactique du concept de concentration chimique.....	26
3.2. Difficultés et conceptions alternatives connues dans l'apprentissage de la concentration chimique .....	50

3.3. Bilan des études visant à remédier aux difficultés connues dans l'apprentissage de la concentration chimique .....	56
4. Question et hypothèse générales de la recherche .....	58
<b>CHAPITRE 2 : CADRE CONCEPTUEL .....</b>	<b>62</b>
1. Qu'est-ce qu'un concept ?.....	63
2. Définition du concept de concentration chimique.....	67
2.1. Définitions des concepts solution, soluté et solvant.....	68
2.2. Définition de la dissolution .....	69
2.3. Définition de la dilution .....	72
2.4. Types de concentration chimique .....	74
2.5. Concentration molaire volumique d'une espèce chimique en solution.....	76
2.6. Propriétés générales de la grandeur concentration chimique et définition retenue dans le cadre de notre étude.....	77
3. Processus enseignement/apprentissage .....	78
3.1. Concept d'apprentissage .....	79
3.2. Implications et orientation de l'apprentissage en contexte scolaire dans le cadre de cette étude .....	93
4. L'apprentissage scientifique en tant que processus de changement conceptuel .....	94
4.1. Origine et évolution du concept de conception en didactique .....	94
4.2. Nécessité de tenir compte des conceptions dans le processus d'enseignement-apprentissage .....	96
4.3. Nécessité de tenir compte des types de raisonnement dans le processus d'enseignement-apprentissage .....	97
4.4. Quelques modèles de changement conceptuel.....	103
4.5. Modèles de coexistence conceptuelle .....	116
4.6. Modèle de prévalence conceptuelle .....	145
5. Formulation opérationnelle des questions et hypothèses spécifiques de recherche.....	149
<b>PARTIE II : CADRE MÉTHODOLOGIQUE ET OPÉRATOIRE.....</b>	<b>151</b>

CHAPITRE 3 : MÉTHODE DE LA RECHERCHE.....	152
1. Type de recherche.....	153
2. Participants.....	154
2.1. Participants du prétest.....	154
2.2. Participants de la phase d'implantation des différents types de remédiation et du post-test.....	157
3. Méthode de collecte des données.....	159
3.1. Méthode de collecte des données du prétest.....	159
3.2. Méthode de collecte des données du post-test.....	185
4. Méthode d'analyse des données.....	210
4.1. Analyse des données du prétest.....	210
4.2. Analyse des données du post-test.....	214
CHAPITRE 4 : PRÉSENTATION ET DISCUSSION DES RÉSULTATS.....	216
1. Mortalité expérimentale.....	217
2. Résultats des questions de la phase du pré-test.....	217
2.1. Résultats des questions traitant la détermination de la concentration ionique dans une solution obtenue en dissolvant une substance ionique dans l'eau.....	217
2.2. Résultats des questions traitant l'intensivité de la grandeur concentration d'une espèce chimique en solution.....	232
2.3. Résultats des questions du pré-test traitant la détermination des concentrations des espèces chimiques dans une solution diluée.....	255
2.4. Résultats des questions du prétest visant à identifier les sources des connaissances que les élèves ont utilisées pour répondre au questionnaire.....	260
2.5. Récapitulatif des résultats obtenus à la phase du pré-test.....	262
3. Résultats du post-test.....	265
3.1. Gain conceptuel par question pour le groupe témoin.....	265
3.2. Gain conceptuel par question pour le groupe expérimental.....	273
3.3. Confrontation des résultats du groupe expérimental et du groupe témoin.....	279

4. Proposition pour l'enseignement.....	284
CONCLUSION GÉNÉRALE.....	286
BIBLIOGRAPHIE.....	290
ANNEXES.....	306
Annexe A : questionnaire du pré-test et du post-test .....	307
Annexe B : fiche d'activités des élèves pour le cours expérimental.....	311
Annexe C : autres exemples des réponses fausses proposées par les participants aux différentes questions .....	319
Annexe D : procédure du test Z de façon manuelle .....	323

*À ma tante NGOUTANE PAULINE*

## REMERCIEMENTS

Au terme de ce travail, c'est avec beaucoup de plaisir que j'exprime ici ma profonde gratitude aux personnes ci-dessous :

- Pr AYINA BOUNI et Pr Hyppolyte NTEDE NGA, mes directeurs de recherche, pour leur rigueur scientifique, leur patience et leur disponibilité. Je repars riche de vos enseignements et je suis très heureux de vous avoir eu comme directeurs de recherche ;
- Pr Audrey Groleau, professeure titulaire de didactique des sciences et de la technologie au Département des sciences de l'éducation de l'Université du Québec à Trois-Rivières, pour les conseils précieux, les encouragements, la disponibilité et le soutien sans faille qui m'ont permis de mener à bien ce travail de longue haleine ;
- Pr Patrice Potvin, professeur de didactique des sciences et de la technologie au secondaire à la Faculté des sciences de l'éducation de l'Université du Québec à Montréal, pour les encouragements et les documents spécialisés sur le changement conceptuel selon l'approche neuroéducative qu'il a mis à ma disposition. Ces documents (livres et articles scientifiques) m'ont permis d'avancer considérablement dans le processus ardu que représente un travail doctoral ;
- Pr Cyrille Bienvenu BELA et Pr Renée Solange NKECK BIDIAS, respectivement Doyen de la faculté des sciences de l'éducation et chef de Département de didactique des disciplines, et tous les enseignants pour tous les savoirs qu'ils m'ont transmis ;
- Pr Mohamed SOUDANI et Dr Jérémie AWOMO ATEBA, respectivement Maître de conférences en didactique de la chimie à l'Université Claude Bernard Lyon 1 et assistant au Département des sciences de l'éducation de l'École normale supérieure de Yaoundé, pour le regard critique et avisé qu'ils ont porté sur mes travaux ;
- mes camarades Samuel KUEMEGNE et Willy Nelson KOUAKAM GONTIO pour tous les échanges scientifiques constructifs menés tout au long de la réalisation de ce travail ;
- Daniel NJIFIÉ, Maurice TEDONKENG, Fabrice FONGANG et Gaston FUMBA, enseignants des sciences physiques dans les établissements respectifs : Lycée classique de Foumban, Lycée bilingue de Nkolmesseng, Lycée de Tello et Complexe scolaire Institut la Référence, pour le travail remarquable qu'ils ont abattu lors du recrutement des participants et de la collecte des données ;
- enfin, mes parents, Samuel YIAGNIGNI et Jeanne YIENOU; mon épouse, YANGOUO Marthe Chantal; mes enfants, Jeanne-Edwige YIENOU MOULIOM, Shanice MOULIOM et Alphonse NGOUH MOULIOM, et toute ma famille pour leur patience tout au long de ces années vécues au rythme de mes recherches et de mes absences.



## LISTE DES ABRÉVIATIONS ET DES SIGLES

APC : Approche Par les Compétences

BOLD : *Blood-Oxygen-Level Dependent*

CCA : Cortex Cingulaire Antérieur

CPDL : Cortex Préfrontal Dorsolatéral

CPVL : Cortex Préfrontal Ventrolatéral

IRMA : Imagerie par Résonance Magnétique anatomique

IRMd : Imagerie par Résonance Magnétique de diffusion

IRMf : Imagerie par Résonance Magnétique fonctionnelle

IUPAC : *International Union of Pure and Applied Chemistry*

MINEDUC : Ministère de l'Éducation

MINESEC : Ministère des Enseignements Secondaires

OBC : Office du Baccalauréat du Cameroun

OCDE ou OECD : Organisation de Coopération et de Développement Économique

PCT : Physique-Chimie-Technologie

pH : Potentiel Hydrogène

PISA : Programme International pour le Suivi des Acquis des élèves

SVTEEHB : Sciences de la Vie et de la Terre, l'Éducation à l'Environnement, l'Hygiène et la Biotechnologie

TEP : Tomographie par émission de positrons

TIMSS: *Trends in International Mathematics and Science Study*

UE: Union Européenne

ZPD : Zone Proximale ou Prochaine de Développement

## LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Quelques exemples de solutions .....	68
Tableau 2 : Nombre d'élèves recrutés par établissement pour la phase du pré- test .....	155
Tableau 3 : Nombre d'élèves recrutés par classe et par groupe pour la phase d'implantation des différents types de remédiation et du post-test.....	159
Tableau 4 : Réponses de la question 3.1 de l'activité 3 portant sur la mobilisation du concept de quantité de matière.....	195
Tableau 5 : Grille d'analyse des données .....	211
Tableau 6 : Synthèse des réponses des participants à la question Q1 du pré-test.....	219
Tableau 7 : Synthèse des réponses des participants à la question Q3 du prétest .....	225
Tableau 8 : Synthèse des réponses des participants à la question Q2 du prétest.....	233
Tableau 9 : Synthèse des réponses des participants à la question Q5 du prétest.....	239
Tableau 10 : Synthèse des réponses des participants à la question Q6 du pré-test.....	245
Tableau 11 : Synthèse des réponses des participants à la question Q7 du pré-test.....	249
Tableau 12 : Synthèse des réponses des participants à la question Q4 du prétest.....	256
Tableau 13 : Synthèse des réponses des participants à la question Q4 du pré-test.....	261
Tableau 14 : Récapitulatif des gains conceptuels par question pour le groupe témoin .....	266
Tableau 15 : Récapitulatif des gains conceptuels par question pour le groupe expérimental.....	273
Tableau 16 : Gains conceptuels par question en fonction du type de remédiation.....	279
Tableau 17 : Moyennes des gains conceptuels pour chaque groupe d'intervention.....	282
Tableau 18 : Table de l'écart réduit centré de la loi normale centrée réduite.....	323

## LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Triangle chimique de Johnstone.....	18
Figure 2 : Triplet de la chimie révisé.....	19
Figure 3 : Chaîne de transposition didactique proposée par Perrenoud.....	27
Figure 4 : Concept de concentration dans le programme de sciences des classes de 6 <sup>ième</sup> et 5 <sup>ième</sup> au Cameroun.....	30
Figure 5 : Concept de concentration dans le programme de PCT de la classe de 3 <sup>ème</sup> au Cameroun .....	32
Figure 6 : Concept de concentration chimique dans le programme de chimie de la classe de 2 <sup>nde</sup> C au Cameroun.....	34
Figure 7 : Représentation iconographique du modèle chimique de l'hydratation des ions dans le curriculum réel.....	38
Figure 8 : Modèle chimique de l'hydratation des ions dans la dissolution d'un cristal ionique .....	39
Figure 9 : Schématisation du processus de la dissolution du soluté dans l'eau dans le curriculum réel.....	40
Figure 10 : Représentation iconographique du modèle chimique de dissolution d'un soluté ionique dans l'eau proposée par l'IUPAC.....	41
Figure 11 : Exemple d'exercice d'application sur le calcul de la concentration molaire dans le manuel Excellence des classes de Seconde C (p. 322).....	44
Figure 12 : Exemple d'exercice sur le calcul de la concentration molaire dans le manuel Excellence des classes de Seconde C (p. 326) .....	44
Figure 13 : Extrait d'un manuel DEWATEK en Physique - Chimie - Technologie des classes de niveau 3 <sup>ème</sup> illustrant le calcul de la concentration d'un ion en solution (p. 44) .....	46
Figure 14 : Schémas montrant la modélisation d'une solution homogène avec pour soluté un liquide et un solide .....	69
Figure 15 : Schéma montrant la modélisation de la dissolution du chlorure de sodium (NaCl) dans l'eau.....	71
Figure 16 : Schéma montrant la modélisation de la dilution d'une solution concentrée.....	73
Figure 17 : Dimensions et facettes de l'apprentissage scolaire suivant le modèle SCI proposées par Jonnaert et Vander Borght.....	87

Figure 18 : Illustration du dynamisme évolutif temporel de l'apprentissage scolaire suivant le modèle SCI proposée par Jonnaert et Vander Borgh	88
Figure 19 : Schématisation des processus des modèles mentaux tacites qui conduisent à une réponse manifeste	99
Figure 20 : Les modèles mentaux résultent des théories naïves selon le modèle de Stella Vosniadou proposé en 1994 traduit par Bêty	109
Figure 21 : Les principales catégories ontologiques proposées par Michelene Chi et ses collaborateurs en 1994	112
Figure 22 : Principaux domaines de recherche en neuroéducation	117
Figure 23 : Disposition topographique des principales régions du cortex cérébral	121
Figure 24 : Connexion synaptique entre deux neurones	123
Figure 25 : Modèles cognitifs du développement: A = Modèle en escalier de Piaget et B = Modèle dynamique non-linéaire de Robert Siegler	141
Figure 26 : La tâche de conservation du nombre de Piaget reprise par Olivier Houdé	141
Figure 27 : Développement non linéaire de stratégies cognitives issues soit du système rapide et heuristique (intuitif) soit du système lent et algorithmique (logique) à tout âge	142
Figure 28 : Exemple d'item d'un test à trois paliers proposé par Şen et Yilmaz (2017, p. 114) pour étudier la compréhension conceptuelle des élèves du secondaire sur le concept de liaison chimique	165
Figure 29 : Exemple d'item d'un test à quatre paliers proposé en cinétique chimique par Habiddin et Mary	167
Figure 30 : Exemple de question à trois paliers élaborée dans le cadre de la présente recherche	169
Figure 31 : Exemple de raisonnement lié aux conceptions alternatives qui conduit au choix de la réponse fausse (a) pour la question Q1 du pré-test	220
Figure 32 : Exemple de raisonnement lié aux conceptions alternatives qui conduit au choix de la réponse fausse (c) pour la question Q1 du pré-test	221
Figure 33 : Exemple de raisonnement lié aux conceptions alternatives qui conduit au choix de la réponse fausse (e) pour la question Q1 du pré-test	223
Figure 34 : Exemple de raisonnement lié à un manque de connaissances qui conduit au choix de la réponse fausse (c) pour la question Q1 du pré-test	224
Figure 35 : Exemple de raisonnement lié aux conceptions alternatives conduisant au choix de la réponse fausse (a) pour la question Q3 du pré-test	227

Figure 36 : Exemple de raisonnement lié à la non-maîtrise de l'écriture et l'équilibration de l'équation de la dissolution du sulfate de potassium dans l'eau conduisant au choix de la réponse fausse (a) à la question Q3 du pré-test .....	228
Figure 37 : Exemple de raisonnement lié à un mauvais agencement conceptuel conduisant au choix de la proposition de la réponse fausse (e) à la question Q3 du pré-test.....	229
Figure 38 : Exemple de raisonnement où la concentration ionique est assimilée à la quantité de matière de soluté dans une solution menant au choix de la réponse fausse b pour la question Q3 du pré-test.....	230
Figure 39 : Exemple de raisonnement lié aux conceptions alternatives conduisant au choix de la réponse fausse (b) à la question Q2 du pré-test.....	235
Figure 40 : Exemple de raisonnement lié aux conceptions alternatives conduisant au choix de la réponse fausse (d) à la question Q2 du pré-test.....	237
Figure 41 : Exemple de raisonnement lié aux conceptions alternatives conduisant au choix de la réponse fausse (a) à la question Q5 du pré-test .....	240
Figure 42 : Exemple de raisonnement lié aux conceptions alternatives conduisant au choix de la réponse fausse (b) à la question Q5 du pré-test.....	241
Figure 43 : Exemple de raisonnement lié à un mauvais agencement conceptuel conduisant à un mauvais choix de réponse à la question Q5 du pré-test .....	244
Figure 44 : Exemple de raisonnement lié aux conceptions alternatives conduisant au choix de la réponse fausse (d) à la question Q6 du pré-test.....	246
Figure 45 : Exemple de raisonnement lié aux conceptions alternatives où la règle de trois est utilisée conduisant au choix de la réponse fausse (d) à la question Q6 du pré-test .....	247
Figure 46 : Exemple de raisonnement lié aux conceptions alternatives menant au choix de la réponse fausse (a) à la question Q7 du pré-test.....	250
Figure 47 : Exemple de raisonnement lié aux conceptions alternatives menant au choix de la réponse fausse (a) à la question Q7 du pré-test dans lequel la règle de trois est mobilisée .....	251
Figure 48 : Exemple de raisonnement lié aux conceptions alternatives menant au choix de la réponse fausse (b) à la question Q7 du pré-test.....	252
Figure 49 : Exemple de raisonnement lié à un manque de connaissances menant au choix de la réponse juste (d) à la question Q7 du pré-test .....	253
Figure 50 : Exemple de raisonnement lié à la présence des conceptions alternatives menant au choix de la réponse fausse (b) à la question Q4 du pré-test .....	257

Figure 51 : Exemple de raisonnement lié à la présence des conceptions alternatives menant au choix de la réponse fausse (d) à la question Q4 du pré-test .....	258
Figure 52 : Exemple de raisonnement lié à un manque de connaissances conceptuelles menant au choix de la réponse fausse (a) à la question Q4 du pré-test.....	259
Figure 53 : Graphe confrontant les gains conceptuels par question en fonction du type de remédiation.....	280

## RÉSUMÉ

La concentration d'une espèce chimique dans une solution est une grandeur très fondamentale en chimie et dans plusieurs autres domaines de la science. Elle est introduite dans l'enseignement au Cameroun en classe de sixième (élèves de 11 à 13 ans). Lors de sa manipulation, les apprenants rencontrent plusieurs difficultés à déterminer correctement la concentration d'une espèce chimique dans une solution aqueuse. Cette recherche a pour but d'évaluer l'impact de la remédiation par changement de prévalence conceptuelle sur les scores des élèves camerounais des séries scientifiques (élèves de plus de 15 ans) de l'enseignement secondaire général éprouvant ces difficultés. Pour atteindre ce but, des questionnaires ont été soumis à la phase du pré-test à 528 élèves des classes de Seconde C, de Première C et D et de Terminale C et D de l'enseignement camerounais francophone pour faire émerger lesdites difficultés ainsi que les causes des raisonnements qui conduisent aux réponses erronées que les élèves proposent lorsqu'ils mobilisent la concentration d'une espèce chimique en solution aqueuse. Les résultats obtenus à l'issue de cette phase montrent que les difficultés les plus récurrentes sont : l'incapacité des apprenants à déterminer correctement les concentrations des espèces chimiques dans une solution lorsque la dissolution d'un composé ne s'effectue plus suivant la proportion 1/1 ; l'incapacité des apprenants à faire fonctionner la formule de calcul de la concentration d'une solution ( $C = n/V$ ) lors de la détermination de la concentration d'une espèce chimique en solution ; la mobilisation incorrecte du caractère intensif de la grandeur concentration chimique lors de la détermination de la concentration d'une espèce chimique en solution. Ces mêmes résultats montrent que les causes de ces difficultés sont principalement d'ordres de carence, didactique, épistémologique et ontologique. La présente étude confronte aussi les scores obtenus au post-test par deux groupes équivalents (60 élèves chacun) identifiés après le pré-test comme ayant des difficultés à conceptualiser la concentration d'une espèce chimique en solution. L'un est soumis à une remédiation impliquant le changement de prévalence conceptuelle et l'autre soumis à une remédiation impliquant le conflit cognitif. Les résultats montrent que comparativement à une remédiation impliquant principalement le conflit cognitif, la remédiation par changement de prévalence conceptuelle améliore de manière plus significative les scores des apprenants. Ainsi, nous pouvons établir qu'un apprentissage basé sur le changement de prévalence conceptuelle permet aux apprenants camerounais de mieux surmonter les difficultés qu'ils rencontrent lors de la détermination de la concentration d'une espèce chimique dans une solution.

**Mots clés :** difficultés d'apprentissage, prévalence conceptuelle, contrôle inhibiteur, concentration chimique, changement conceptuel et remédiation.

## ABSTRACT

The concentration of a chemical species in a solution is a very fundamental quantity in chemistry and in several other fields of science. It is introduced into education in Cameroon in sixth grade (students aged 11 to 13). When handling it, learners encounter several difficulties in correctly determining the concentration of a chemical species in an aqueous solution. This research aims to evaluate the impact of remediation by change in conceptual prevalence on the scores of Cameroonian students in the scientific series (students over 15 years old) in general secondary education experiencing these difficulties. To achieve this goal, questionnaires were submitted at the pre-test phase to 528 students of Second C, First C and D and Terminal C and D classes of French-speaking Cameroonian education to bring out the said difficulties as well as the causes of the reasoning that leads to the erroneous answers that the pupils propose when they mobilize the concentration of a chemical species in aqueous solution. The results obtained at the end of this phase show that the most recurrent difficulties are: the inability of learners to correctly determine the concentrations of chemical species in a solution when the dissolution of a compound no longer takes place according to the proportion 1/1; the inability of learners to operate the formula for calculating the concentration of a solution ( $C = n/V$ ) when determining the concentration of a chemical species in solution; incorrect mobilization of the intensive nature of the chemical concentration quantity when determining the concentration of a chemical species in solution. These same results show that the causes of these difficulties are mainly of the order of deficiency, ontological, epistemological and didactic. This study also compares the scores obtained in the post-test by two equivalent groups (60 students each) identified after the pre-test as having difficulty conceptualizing the concentration of a chemical species in solution. There are two remediation: one involves the change in conceptual prevalence and the other involves cognitive conflict. The results show that compared to a remediation involving mainly the cognitive conflict, the remediation by change of conceptual prevalence improves in a more significant way the scores of the learners. Thus, we can establish that a learning based on the change of conceptual prevalence allows Cameroonian learners to better overcome the difficulties they encounter when determining the concentration of a chemical species in a solution.

**Keywords:** learning difficulties, conceptual prevalence, inhibitory control, chemical concentration, conceptual change and remediation.



## **INTRODUCTION GÉNÉRALE**

La chimie est une science qui cherche à comprendre la composition, les comportements et les transformations que subissent toutes les substances qui forment notre univers. En tant que discipline scolaire, la physique et la chimie formaient les deux parties de la discipline sciences physiques dans l'enseignement secondaire du système éducatif francophone camerounais. Ce n'est qu'en 1994 que la chimie est instituée dans cet ordre d'enseignement comme discipline scolaire autonome (Awomo Ateba & Ayina Bouni, 2020). Pour améliorer l'apprentissage dans ce champ disciplinaire, les programmes d'études ont subi plusieurs réformes<sup>1</sup> jusqu'à ce jour. Ces réformes visent une meilleure acquisition des concepts fondamentaux afin de mieux appréhender son environnement.

Parmi les concepts fondamentaux en chimie, nous avons la concentration chimique. Sa particularité est que c'est grâce à cette grandeur chimique que dans les laboratoires scientifiques, les chercheurs connaissent à tout moment la quantité de soluté dissous dans un volume donné de solution qu'ils manipulent. C'est la raison pour laquelle elle est centrale en chimie et dans plusieurs autres domaines de la science tels que la physique, la biologie, la médecine, le secteur agroalimentaire, le secteur pharmaceutique, etc.

La concentration chimique peut paraître, à première vue, « facile » à conceptualiser par les apprenants. Mais cette perception est rapidement dissipée, car en tant qu'enseignant de chimie, physique et technologie au secondaire camerounais, nous avons constaté que les apprenants, quel que soit leur niveau, éprouvent beaucoup de difficultés lors des résolutions des situations conceptuellement problématiques qui l'impliquent. Ces difficultés sont davantage perceptibles chez les apprenants lors de l'exécution d'une tâche qui implique le calcul de la concentration d'une espèce chimique en solution. Or, cette dimension de la concentration chimique est très importante dans l'apprentissage et dans la compréhension

---

<sup>1</sup>Le premier programme de l'enseignement secondaire des sciences physiques du Cameroun francophone post indépendant a été défini par la circulaire n°77/D/59/SG/IGP/IPNPC du 7 octobre 1982. En ce qui concerne l'enseignement et l'apprentissage de la chimie proprement dit, la première réforme date de 1994 avec la définition du premier curriculum de l'enseignement et de l'apprentissage de la chimie du second cycle de l'enseignement secondaire général par l'arrêté n°24/D/80/MINEDUC/IGP/ESG du 22 juin 1994. La deuxième réforme date de 2000 avec la définition des programmes de chimie, physique et technologie pour les classes de quatrième et de troisième du premier cycle de l'enseignement secondaire général par l'arrêté n°337/D/80/MINEDUC/SG/IGP/ESG du 11 septembre 2000. La troisième réforme date de 2014 avec la signature de l'arrêté n°263/14/MINESEC/IGE/ESG du 13 août 2014 définissant les programmes de sciences des classes de sixième et cinquième où plusieurs concepts de bases de la chimie sont introduits dans lesdites classes. Cette dernière réforme qui est la plus récente, marque le point de départ de la restructuration de tous les programmes de chimie des classes du secondaire de l'enseignement francophone camerounais qui va suivre jusqu'à ce jour.

de ce concept et, plus largement, des phénomènes chimiques. Nous avons également constaté que la situation n'est guère plus reluisante en ce qui concerne sa transposition dans plusieurs manuels de chimie camerounais. Face à ces constats, nous nous sommes posé la question de savoir : comment aider les apprenants à mieux surmonter les difficultés qu'ils rencontrent lors de la détermination de la concentration d'une espèce chimique en solution ? Cette question est au cœur de la présente recherche.

En ce qui concerne son enseignement-apprentissage, le concept de concentration chimique est introduit dans l'enseignement secondaire général francophone camerounais au niveau de la classe de 6<sup>ième</sup> (élèves de 11 à 13 ans). Ce n'est qu'à partir des classes de 3<sup>ième</sup> et de 2<sup>de</sup> scientifique (élève de plus de 15 ans) qu'il doit être véritablement conceptualisé et mobilisé par les apprenants. C'est la raison, pour laquelle nous avons focalisé notre étude au second cycle de cet ordre d'enseignement.

La présente recherche consiste dans un premier temps, à diagnostiquer les difficultés rencontrées par les apprenants et leurs origines lorsqu'ils résolvent les situations conceptuellement problématiques portant sur le concept de concentration d'une espèce chimique en solution. Il s'agit aussi d'identifier les causes des raisonnements qui conduisent aux réponses erronées des apprenants. Dans un second temps, nous avons élaboré les activités de remédiation à ces difficultés qui permettront aux apprenants de remettre en question leurs propres conceptions et de faire prévaloir les conceptions pertinentes sur celles non pertinentes. Le but poursuivi est double : réaliser, dans un premier temps, un changement conceptuel chez les élèves lors de la construction du concept de concentration des espèces chimiques en donnant, dès le départ, les bases des connaissances scientifiques que l'on souhaite voir émerger pour qu'elles entrent très rapidement dans la course avec leurs idées préconçues. Par la suite, il s'agit d'entraîner les apprenants à reconnaître les circonstances dans lesquelles ils devraient résister à utiliser leurs idées préconçues et mécanismes routiniers des résolutions des problèmes développés durant l'apprentissage au profit plutôt de l'emploi des connaissances scientifiques apprises et adaptées à la circonstance. Évaluer, dans un second temps, l'impact desdites activités sur les scores des apprenants lorsqu'ils sont de nouveau interrogés sur des questions liées à la concentration d'une espèce chimique en solution.

L'étude comprend quatre chapitres. Le premier chapitre pose la problématique de l'enseignement-apprentissage de la chimie en général et celui de la concentration chimique

en particulier, qui a permis de formuler la question principale et l'hypothèse principale de cette recherche. Dans le deuxième chapitre portant sur le cadre conceptuel, les concepts clés de cette recherche sont définis suivis de la présentation du modèle de la prévalence conceptuelle qui a permis de formuler de manière opérationnelle les questions et hypothèses spécifiques de cette recherche. Ces deux chapitres forment la première partie de l'étude intitulée cadre théorique de l'étude. Le troisième chapitre présente la méthodologie employée pour valider ou invalider les hypothèses de cette recherche. Le quatrième chapitre qui est le dernier chapitre de la thèse présente les résultats obtenus ainsi que leur discussion. Ces deux autres chapitres forment, à leur tour, la deuxième partie de l'étude intitulée cadre méthodologique et opératoire de l'étude. Enfin, une conclusion générale où les retombées éducatives envisagées et des perspectives de recherche sont présentées.

## **PARTIE 1 : CADRE THÉORIQUE DE L'ÉTUDE**

## **CHAPITRE 1 : PROBLÉMATIQUE**

Il est question pour nous dans ce chapitre de présenter en premier lieu les recommandations pour l'enseignement et l'apprentissage des sciences, plus particulièrement celui de la chimie, dans le contexte général et dans le contexte camerounais afin de comprendre comment les concepts chimiques sont transposés dans notre milieu de recherche. Par la suite, nous allons présenter les problèmes d'apprentissage de la chimie et de la concentration chimique plus précisément, dans le but de dégager le problème qui a conduit à la question principale de cette recherche à laquelle nous tenterons ensuite de répondre.

## **1. Fondements de l'enseignement scientifique et de l'enseignement de la chimie**

La science est définie comme un mode de pensée qui permet de comprendre le monde qui nous entoure et ultimement de nous comprendre nous-mêmes et de comprendre la nature de la relation de notre esprit avec le reste du monde (Potvin et al., 2007). Pour plusieurs penseurs, la science est la plus grande invention de l'esprit humain, car elle ne repose ni sur la révélation, ni sur l'autorité, ni sur la tradition, ni sur la croyance, mais plutôt sur des faits établis et vérifiables. C'est la raison pour laquelle elle est fondamentalement différente des autres formes de pensée pratiquées par l'humain ou de toutes les autres formes de discours. Plus explicitement, la science vise à produire de la connaissance sur le monde (Chalmers, 1991).

Vu la complexité et l'évolution rapide du monde matériel dans lequel nous vivons, la société attend de la science le développement de plus de connaissances positives et applicables au bénéfice de tous et de prévenir si possible, les risques auxquels nous exposent nos efforts pour maîtriser la nature. La chimie en tant que science qui étudie la composition et les transformations de la matière doit fournir des connaissances qui peuvent être appliquées pour faire des profits, donner le choix aux consommateurs, sauver des vies et améliorer la santé, etc. (Taber, 2019). C'est, la raison pour laquelle l'éducation à la culture scientifique à l'égard du public (les personnes de tout âge) est désormais devenue une priorité de l'enseignement des sciences à travers le monde (DeBoer, 2000 ; Gilbert & Treagust, 2009). Cette vision de l'enseignement et de l'apprentissage des sciences date du 19<sup>e</sup> siècle qui est la période où la science est devenue une partie du programme scolaire tant en Europe qu'aux États-Unis (DeBoer, 2000).

Plus explicitement, que l'éducation à la culture scientifique soit faite de manière formelle ou informelle, DeBoer (2000) a résumé en neuf points, les objectifs à atteindre par l'enseignement et l'apprentissage des sciences à savoir :

- enseigner et apprendre la science en tant que force culturelle dans le monde moderne. Pour DeBoer, la science est une partie de notre patrimoine intellectuel et de notre expérience culturelle qui doit être transmise de génération en génération. Ainsi, un individu alphabétisé doit savoir quelque chose sur la façon dont le monde naturel fonctionne, sur la façon de penser scientifique et sur l'effet de la science sur la société;
- les cours des sciences doivent préparer les apprenants au monde du travail. Il s'agit de donner aux apprenants les connaissances et les compétences qui sont utiles dans le monde du travail et qui améliorent aussi leurs perspectives d'emploi à long terme dans un monde où la science et la technologie jouent un rôle très important ;
- enseigner et apprendre la science qui a une application directe dans la vie quotidienne. Pour ce faire, il faut sélectionner puis enseigner les concepts et les principes scientifiques de manière à ce que chaque apprenant voit les applications de la science dans leur vie quotidienne. À ce sujet, Potvin (2018) suggère de ne pas limiter seulement l'enseignement des sciences et de la technologie à la description savante des principes scientifiques, mais de dire aussi ce que ces principes « font » ;
- l'éducation scientifique doit contribuer à former des citoyens informés et cultivés. Elle doit apprendre aux apprenants à être des citoyens prêts à traiter intelligemment les questions sociales liées à la science, et à influencer, le cas échéant, les politiques liées à l'impact de la science sur la société ;
- l'enseignement et l'apprentissage des sciences doivent initier les apprenants à examiner le monde naturel et matériel de façon particulière. C'est-à-dire rendre les apprenants capables de reconnaître les circonstances où les méthodes scientifiques sont utilisées correctement, et quand elles ne le sont pas ;
- l'éducation scientifique doit aussi viser à former des citoyens capables de comprendre les rapports et les discussions scientifiques. De prendre part activement à des discussions sur la science et sur les questions liées à la science qui font partie de leur expérience quotidienne ;
- l'éducation à la science doit amener les apprenants à apprécier la diversité et la complexité fascinantes du monde naturel et matériel qui nous entourent. Il s'agit ici d'enseigner et d'apprendre les sciences pour son attrait esthétique ;



- l'enseignement et l'apprentissage des sciences doivent faire progresser les connaissances dans le domaine de la science lui-même. C'est-à-dire préparer la population à une sympathie envers la science et l'amener à recourir à l'expertise scientifique ;
- enfin, l'enseignement et l'apprentissage des sciences doivent inclure une discussion sur la nature de la technologie et de l'interdépendance entre la science et la technologie en raison de l'importance pratique de la technologie dans le monde et de la relation étroite que la technologie entretient avec la science. Pour ce faire, l'enseignement et l'apprentissage des sciences doivent développer les compétences nécessaires pour planifier, réaliser et évaluer les conceptions technologiques.

D'après ces objectifs, l'enjeu majeur de l'éducation à la culture scientifique à travers le monde est de permettre à tout un chacun, et particulièrement aux jeunes apprenants, la construction d'une culture globale et solide nécessaire pour comprendre les grands enjeux de la vie contemporaine. La contribution que l'enseignement et l'apprentissage de la chimie doivent apporter à cette éducation à la culture scientifique du public est le développement de la compréhension des connaissances chimiques. À ce sujet, DeBoer (2000) ; Shwartz et al., (2005) ; Gilbert et Treagust (2009) pensent que l'acquisition de connaissances chimiques doit consister à :

- comprendre la nature de la chimie, ses normes et ses méthodes. C'est-à-dire comprendre comment les chimistes accomplissent leur travail et comment les produits de leur activité sont acceptés comme des connaissances scientifiques ;
- en savoir plus sur la chimie en tant que force culturelle dans le monde moderne. Il s'agit par exemple, de connaître comment l'émergence de la chimie a permis de fabriquer avec efficacité les médicaments, les produits agro-alimentaires, l'élargissement considérable des gammes des matériaux de construction (par exemple les plastiques et le fer...), etc. ;
- comprendre les théories, les concepts et les modèles fondamentaux de la chimie ;
- apprendre les savoirs chimiques qui permettent à une personne de devenir un citoyen plus informé pour exemple, pouvoir discuter de manière rationnelle sur l'utilisation des sources d'énergie durables ou d'un produit chimique fabriqué (composition, conservation, durabilité...)

- être capable de communiquer, de lire et d'écrire sur la chimie. C'est-à-dire être capable de communiquer efficacement en utilisant le vocabulaire propre de la chimie permettant à une personne d'avoir accès à la sphère de connaissances chimiques ;
- comprendre comment les technologies basées sur la chimie sont liées les unes aux autres. C'est-à-dire comprendre comment la chimie et les technologies liées à la chimie cherchent à changer le monde naturel alors que la chimie cherche à produire des explications sur le monde naturel. Comprendre aussi comment les concepts et les modèles produits dans ces deux domaines ont une forte interrelation et s'influencent mutuellement ;
- apprécier l'impact de la chimie et des technologies liées à la chimie sur la société. En d'autres termes, comprendre la nature des phénomènes auxquels la chimie est applicable afin de modifier ou de changer notre façon de voir le monde naturel.

Ces objectifs de l'acquisition des connaissances chimiques sont conformes aux exigences de l'éducation à la culture scientifique à travers le monde que nous avons supra mentionné. Pour se conformer à ces exigences de l'éducation à la culture scientifique et à la culture chimique plus particulièrement, plusieurs pays à travers le monde (Gilbert & Treagust, 2009) y compris le Cameroun, le lieu où s'est déroulé la présente recherche, ont reformé leurs curricula de chimie.

### **1.1. Fondements de l'enseignement scientifique et de l'enseignement de la chimie au Cameroun**

Les premiers fondements sur lesquels reposaient l'enseignement et l'apprentissage des sciences physiques dans le secondaire camerounais ont été définis par la circulaire n°77/D/59/SG/IGP/IPNPC du 7 octobre 1982. Il ressort de cette circulaire qui constituait le tout premier programme de l'enseignement des sciences physiques du Cameroun francophone post indépendant que : l'enseignement des sciences physiques a pour but moins l'acquisition par nos élèves des nombreuses connaissances que le développement de leurs facultés, la formation de leur esprit et leur initiation à la méthode propre à ces sciences... (Awomo Ateba & Ayina Bouni, 2020).

Dans ce programme, la physique et la chimie formaient une même discipline et elles n'étaient qu'enseignées dans le seconde cycle de l'enseignement secondaire (élèves de plus de 15 ans). Cette situation se justifiait par le fait que même à l'École Normale Supérieure de Yaoundé (ENS de Yaoundé) où les enseignants de ces disciplines étaient formés, il existait

à cette époque un seul Département pour les deux matières à savoir, le Département des sciences physiques (Awomo Ateba & Ayina Bouni, 2020). De même, les épreuves des examens officiels en science physique de cette époque comportaient deux parties : la physique sur 14 points et la chimie sur 6 points. Soient deux exercices de physique (un exercice de questions de cours sur six points et un problème sur 8 points) et un exercice exclusif des questions de cours de chimie sur 6 points (Awomo Ateba & Ayina Bouni, 2020).

Cette faible proportion que la chimie occupait dans ces curricula d'enseignement des sciences physiques fait qu'elle est restée longtemps phagocytée par la physique dans le paysage de l'enseignement secondaire francophone du Cameroun. Elle a aussi participé à plusieurs constructions mentales au sein de l'opinion à savoir : la chimie est une matière scolaire « facile » à apprendre par rapport aux autres matières scientifiques ; la chimie est une « sous-partie » de la physique...

Mais la scission en 1986 du Département des sciences physiques de l'ENS de Yaoundé en deux Départements distincts à savoir: le Département de physique et le Département de chimie (Awomo Ateba & Ayina Bouni, 2020) marque le point de départ des différentes réformes que vont subir plus tard les curricula des sciences physiques (physique et chimie) du secondaire. Cela dans le but d'améliorer qualitativement et quantitativement l'enseignement des sciences physiques au Cameroun. De plus, ces différentes réformes vont faire de la chimie une discipline scolaire autonome dans l'enseignement secondaire camerounais à partir de 1994 ( Awomo Ateba & Ayina Bouni, 2020). Ainsi, le tout premier curriculum de l'enseignement et de l'apprentissage de la chimie de cet ordre d'enseignement sera défini par l'arrêté n°24/D/80/MINEDUC/IGP/ESG du 22 juin 1994 et elle n'était qu'enseignée dans le second cycle. Dans ce programme, les objectifs majeurs étaient de donner à l'apprenant les notions de base de la chimie et de lui faire maîtriser le vocabulaire correct utilisé en chimie.

Lesdites réformes vont concerner les classes de quatrième (élèves de 14-15 ans) de troisième (élèves de 15-16 ans) du premier cycle de l'enseignement secondaire général francophone camerounais par la signature, le 11 septembre 2000, de l'arrêté n°337/D/80/MINEDUC/SG/IGP/ESG portant définition des programmes de Chimie, Physique et Technologie de ces classes. Les objectifs poursuivis par ces programmes sont conformes aux recommandations des derniers états généraux de l'éducation nationale au Cameroun tenus en 1995 qui stipulent : l'enseignement doit contribuer à ce que chaque

enfant puisse devenir à terme, un produit actif, capable de créativité, d'auto-emploi et susceptible de s'adapter à tout moment à l'évolution de la science, de la technique et de la technologie. Contrairement aux programmes de 1994, il est recommandé aux enseignants dans ces nouveaux programmes d'aider les élèves à acquérir les savoirs et les savoir-faire dans ces domaines d'études en s'appuyant, cette fois-ci, sur l'observation des objets physiques et chimiques, des phénomènes physiques et chimiques et sur l'expérimentation.

Le parachèvement de ces différentes réformes sera marqué par la signature de l'arrêté n°263/14/MINESEC/IGE/ESG du 13 août 2014, portant définition des programmes de sciences des classes de sixième et de cinquième (élèves de 11-13 ans) élaborés et expérimentés depuis 2012. Parmi les matières enseignées, la chimie y figure en bonne place où certains de ses concepts clés (qui n'étaient qu'enseignés au second cycle) y sont introduits en classe de sixième. C'est le cas des concepts tels que : la solution aqueuse, la solubilité, l'acidité, la basicité, le pH d'une solution et la concentration chimique. La particularité des programmes de sciences de 2014 réside aussi au niveau du fait qu'ils priorisent le développement des compétences scientifiques et technologiques chez les élèves. La pratique enseignante qu'ils recommandent est l'approche par les compétences avec une entrée par les situations de vie (APC-ESV). De façon plus globale, les attentes mentionnées dans ces programmes de sciences sont :

- l'évolution d'une pédagogie transmissive et par objectif à une pédagogie basée sur le développement de compétences permettant de résoudre des situations de vie concrète ;
- l'évolution d'une école coupée de la société à une école permettant de s'insérer dans le tissu socioculturel et économique ;
- l'évolution d'une évaluation des savoirs à une évaluation des compétences nécessaires à un développement durable. ...Afin de rendre l'apprenant capable d'autonomie, capable d'apprendre tout au long de sa vie, d'œuvrer pour le développement durable, d'exercer une citoyenneté responsable.

Dans le domaine de la chimie plus spécifiquement, les nouveaux programmes des classes de séries scientifiques de l'enseignement secondaire général francophone visent globalement à faciliter une bonne assimilation par l'élève des concepts chimiques afin de développer des compétences lui permettant de :

- comprendre et d'expliquer des phénomènes naturels dans son environnement ;

- résoudre les problèmes disciplinaires que ces derniers posent dans leurs domaines de vie ;
- sauvegarder et gérer durablement son environnement ;
- implémenter la démarche scientifique et la démarche technologique.

Pour mieux expliciter les attentes liées à ces nouveaux programmes de chimie, il est spécifié dans le programme de chimie de la classe de Seconde C que le processus enseignement-apprentissage de la chimie doit :

- donner aux élèves du cycle secondaire la possibilité de développer leur culture scientifique et leurs compétences dans un environnement où ils seront de plus en plus amenés à faire des choix dans les situations où ils seront engagés ou qui engagent leur environnement ;
- les familiariser avec la méthode scientifique d'une façon accessible et simple, à travers le travail en groupe et l'expérimentation. Ils permettront aussi une bonne assimilation des concepts de chimie liés à des applications technologiques ou à des phénomènes de la vie quotidienne, à la santé et à l'environnement.

Dans ces nouveaux programmes de chimie, il est aussi recommandé à l'enseignant de mieux jouer son rôle de facilitateur auprès de l'élève en l'amenant de plus en plus à mieux utiliser et à capitaliser les acquis et les connaissances construits en classe. Ce rôle central de l'enseignant dans le processus d'apprentissage des sciences et de la chimie en particulier, est en droite ligne avec les recommandations de la loi de l'orientation de l'éducation au Cameroun du 4 avril 1998 en son article 37 alinéas 1<sup>2</sup> qui fait de l'enseignant le principal garant de la qualité de l'éducation.

Lorsque nous analysons les différentes recommandations issues des programmes des sciences physiques qui ont été élaborés jusqu'à ce jour, nous constatons que l'amélioration du processus enseignement-apprentissage des sciences physiques en général et celui de la chimie en particulier est devenue une priorité nationale après la tenue des états généraux de l'éducation nationale en 1995. De plus, tout comme l'éducation à la culture scientifique à travers le monde, l'éducation à la culture scientifique et en particulier à la culture chimique

---

<sup>2</sup>Article 37 du titre IV des dispositions générales de loi n°98/004 du 4 avril 1998 de l'orientation de l'éducation au Cameroun dans son chapitre III concernant les enseignants stipule que : (1) L'enseignant est le principal garant de la qualité de l'éducation. À ce titre, il a droit, dans la limite des moyens disponibles, à des conditions de vie convenables, ainsi qu'à une formation initiale et continue appropriée.

au Cameroun vise à contribuer à la compréhension du monde matériel, à l'acquisition d'une culture scientifique et technologique adaptée à l'évolution de la société actuelle et à la familiarisation avec les méthodes scientifiques et techniques.

Mais, dans le processus enseignement-apprentissage, un constat est fait selon lequel ce n'est pas parce que les enseignants enseignent que les élèves apprennent. Dès lors, pour juger le degré d'atteinte des objectifs d'apprentissage visés dans n'importe quelle discipline scolaire, l'analyse des performances des élèves qui sont des indices importants d'apprentissage devient importante. C'est la raison pour laquelle nous allons examiner dans la section suivante, les performances des apprenants dans le domaine des sciences physiques pour se faire une opinion sur le niveau de construction des connaissances scientifiques par ces derniers dans ce domaine d'étude.

## **1.2. Rendement des apprenants dans le domaine de la science et dans le domaine de la chimie**

Comme nous l'avons montré précédemment, le développement de la pensée conceptuelle, de l'esprit critique et du raisonnement logique qui sont à la base du développement technologique et du développement scientifique qui gouvernent le monde (Legendre, 1994) passent par la formation scientifique. Malheureusement, ce développement de la culture scientifique et technologique laisse à désirer dans presque tous les pays du monde (Halloun, 2019). Les résultats de l'enquête du programme international pour le suivi des acquis des élèves (PISA) 2018 qui évalue le niveau de compétence en compréhension de l'écrit, en mathématiques et en sciences des élèves des pays membres de l'organisation de coopération et de développement économique (OCDE) illustrent bien cette situation. Par exemple, ces résultats montrent que les performances moyennes en sciences n'ont pas connu d'évolution notable entre 2006 (la première fois que la science a été évaluée dans le domaine principal) et 2018, mais ont plutôt diminué entre 2012 et 2018. De même, les résultats de l'enquête du *Trends in International Mathematics and Science Study* (TIMSS) 2015 qui mesure la performance des élèves en mathématiques et sciences des pays de l'Union européenne (UE) et de l'OCDE montrent qu'une majorité d'élèves arrivent difficilement à fournir une explication scientifique pertinente à des questions portant sur les concepts fondamentaux en science (Allaire-Duquette, 2018).

La situation n'est guère plus reluisante dans le domaine de l'apprentissage de la chimie. Plusieurs études dans divers milieux à travers le monde ont montré qu'il y a une baisse

constante des performances des apprenants en chimie (Agogo & Omagbu, 2014 ; Atagana & Engida, 2014 ; Cardellini, 2012 ; Kazembe & Musarandega, 2012 ; Woldeamanuel & Halloun, 2019). Le Cameroun n'échappe pas à cette réalité, car les résultats des élèves du secondaire aux examens officiels publiés par l'office du baccalauréat du Cameroun (OBC) ne sont pas encourageants non plus. Par exemple, les résultats publiés par l'OBC depuis plus de dix ans montrent que les taux de réussite au baccalauréat et au probatoire des séries scientifiques atteignent difficilement 65 %. Au-delà de ce rendement, il ressort aussi au regard du constat fait par l'OBC que la chimie fait partie des matières qui enregistrent un mauvais rendement à ces examens (baccalauréat surtout). Soit 17,91 % en chimie pour les séries C et D et TI à la session 2021<sup>3</sup>.

Ces résultats montrent que malgré les différentes recommandations pour une bonne éducation à la culture scientifique, les rendements des apprenants en sciences physiques et plus particulièrement en chimie ne sont pas satisfaisants. De nombreuses raisons ont été avancées par plusieurs études en didactique de la chimie quant à ces mauvaises performances en chimie. Parmi ces raisons, nous avons la nature abstraite des concepts chimiques ainsi que d'autres difficultés d'apprentissage des divers ordres.

## **2. Quelles sont les difficultés d'apprentissage de la chimie ?**

Dans cette partie, nous allons préalablement définir la chimie avant de présenter les difficultés d'apprentissage rencontrées dans ce domaine d'étude.

### **2.1. Qu'est-ce que la chimie ?**

La chimie est la partie de la science qui s'intéresse principalement à la structure de la matière et aux transformations qu'elle peut subir, que cette matière constitue un système vivant ou non (Brochard-Wyart et al., 2016). De par son origine, la chimie a longtemps été considérée par le public et certains experts comme une science purement expérimentale (Ayina Bouni, 2013). En tant que science expérimentale, la chimie a été appliquée depuis la nuit des temps dans la métallurgie, la fermentation, la fabrication des teintures, des colles et des parfums, etc. (Barlet, 1999). C'est la raison pour laquelle l'enseignement de la chimie, dans la plus part des cas, débute par des expériences alors que les premiers penseurs de la Grèce antique n'ont mené aucune enquête, ni aucune expérience pour suggérer la nature

---

<sup>3</sup> Palmarès des sessions examens 2021 de l'OBC publié dans le quotidien le jour n° 3628 du mardi 15 mars 2022, page 2, disponible sur <http://lequotidienlejour.info>.

particulière de la matière (Gilbert & Treagust, 2009 ; Pullman, 1995). Ils ont tout simplement observé la nature et ont commencé à réfléchir sur la façon dont le monde pouvait être expliqué pour émettre l'idée selon laquelle une substance qui semble macroscopiquement totalement homogène est microscopiquement inhomogène (Gilbert & Treagust, 2009). Cette idée purement philosophique est le fondement du modèle atomique qui est à la base de la chimie moderne avec les connaissances et un cadre conceptuel qui lui sont propres.

Cette conception nouvelle de la chimie fait d'elle, une discipline scientifique hautement conceptuelle qui a pour objectif principal de trouver des explications rationnelles aux phénomènes qui régissent la constitution de la matière. Mais la complexité de la nature de la matière – avec des existants qui sont de nature particulière et invisible (atomes, molécules et ions) (Ayina Bouni, 2013) – fait que comprendre cette nature parfois très complexe de la matière nécessite un niveau d'abstraction très élevé. Il s'agit pour la chimie, d'entreprendre l'explication du visible compliqué par du visible naturel simple ou parfois par de l'invisible également simple (Pullman, 1995) pour deviner l'existence ou les propriétés d'objets qui sont encore au-delà de notre connaissance (Perrin, 2012). C'est cette nature complexe et abstraite de la chimie qui la rend particulière parmi les autres sciences et rend, malheureusement, son apprentissage difficile pour les élèves (Agogo & Omagbu, 2014 ; Chandrasegaran et al., 2007 ; Gilbert & Treagust, 2009 ; Ouasri & Ravanis, 2020).

Les difficultés d'apprentissage de la chimie peuvent, d'une part, provenir des multiples niveaux de représentation des savoirs chimiques utilisés pour décrire et expliquer les phénomènes chimiques (Gilbert & Treagust, 2009 ; Johnstone, 1982 ; Talanquer, 2011). D'autre part, elles sont aussi dues au fait que les apprenants arrivent dans les cours des sciences physiques et plus particulièrement celui de la chimie avec leurs propres conceptions sur des phénomènes ou des concepts à étudier qui sont, dans la plupart des cas, en décalage avec les savoirs scientifiques qu'on veut leur faire acquérir (Chandrasegaran et al., 2007 ; Benzidia et al., 2021 ; Ouasri & Ravanis, 2020).

## **2.2. Difficultés d'apprentissage liées aux niveaux de représentation des savoirs chimiques**

D'après Johnstone (1982), il existe trois grands niveaux de représentations pertinentes à la compréhension des concepts chimiques à savoir :

- le niveau macroscopique ou phénoménologique qui représente le monde réel de la chimie. Ce niveau décrit les propriétés empiriques globales des solides, des liquides

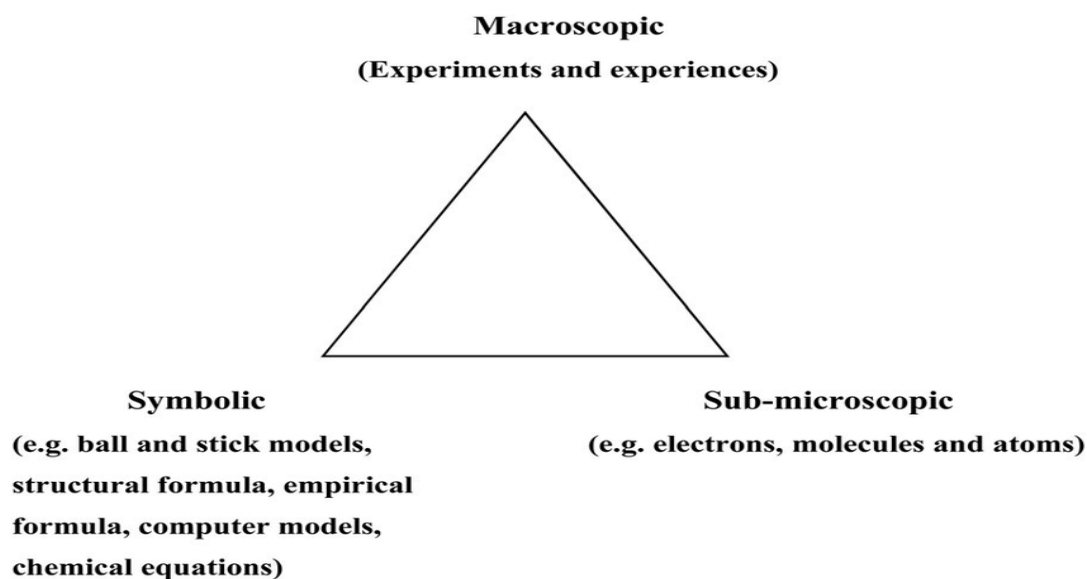


- (y compris les solutions, notamment les solutions aqueuses), des gaz... qui sont perceptibles et mesurables dans les laboratoires de chimie et dans la vie de tous les jours. Par exemple : le changement de couleur d'une solution, le pH d'une solution, la formation des gaz et des précipités au cours des réactions chimiques, la masse, la densité, la concentration chimique, la température et la pression osmotique ;
- le niveau sous-microscopique ou microscopique qui représente le monde imaginaire de la chimie. Il fournit des modèles explicatifs aux observations faites au niveau macroscopique en utilisant les formes particulières de la matière (atomes, des molécules et des ions). Les descriptions à ce niveau peuvent être données en mode visuel de représentation (animations), ou en mode matériel (remplissage d'espace avec des boules, des bâtons...). C'est ce niveau qui permet plus concrètement aux chimistes de mettre en ordre et de rationaliser le comportement des multiples espèces chimiques pour rendre visibles et interprétables les multiples observations expérimentales. Ce processus est appelé la modélisation microscopique et structurale (Barlet, 1999) ;
  - le niveau symbolique ou iconique qui implique l'utilisation des symboles chimiques, des formules et d'équations chimiques. C'est ce niveau de représentation qui est utilisé à la fois pour modéliser le niveau macroscopique ou le niveau microscopique ou pour établir le lien entre ces deux niveaux.

Ces trois niveaux de la représentation des savoirs chimiques forment les sommets d'un triangle appelé triplet de la chimie (Ayina Bouni, 2013) ou triangle chimique d'Alex Johnstone comme l'indique la figure 1.

**Figure 1**

*Triangle chimique de Johnstone (Johnstone, 1982)*

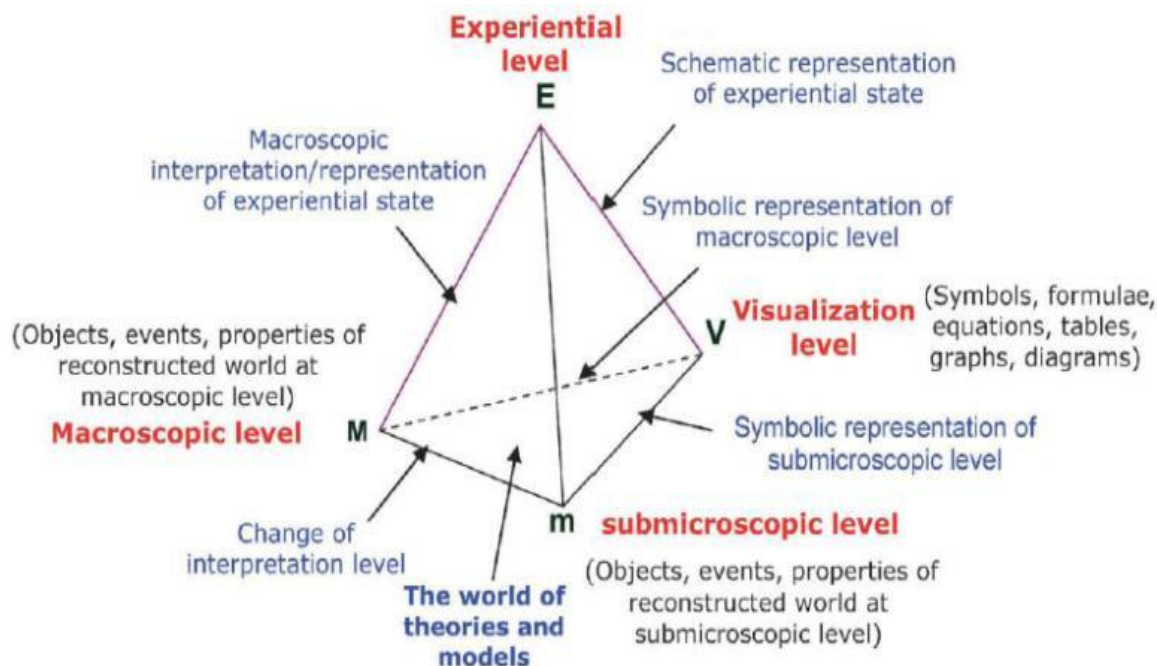


Dans le souci d'améliorer la compréhension du triangle de Johnstone, plusieurs recherches dans le domaine de la didactique de la chimie ont apporté un certain nombre de bonifications sur les niveaux des savoirs macroscopique et symbolique. Pour ce faire, Dehon et Snauwaert (2015) ; Dumon et Mzoughi-Khadhraoui (2014) ; Kermen et Meheut (2009) ; Talanquer (2011) et Taber (2013) ont différencié le niveau macroscopique du triplet de Johnstone en deux sous-niveaux ou registres. Il s'agit du registre qui relève du champ expérimental ou empirique lié aux phénomènes chimiques observables ou mesurables ainsi que les dispositifs expérimentaux qui ont conduit à ces phénomènes et du registre des modèles macroscopiques qui les interprètent ou les modélisent. De même, ils ont aussi différencié dans le niveau symbolique les éléments qui relèvent du registre de l'expérience, du registre des modèles et du registre des « visualisations ». Le registre des visualisations qui est selon ces chercheurs, le plus important et qui correspond à tous les signes visuels qui servent à communiquer qualitativement et quantitativement sur les expériences et les modèles en chimie (Dumon & Mzoughi-Khadhraoui, 2014). Le registre des visualisations fait du niveau symbolique, un puissant outil de communication et de visualisation en chimie en plus du fait qu'il relie le niveau microscopique au niveau macroscopique.

Tous les progrès apportés au triplet de Johnstone, ont abouti à l'élaboration par Dumon et Mzoughi-Khadhraoui (2014) d'un triplet de la chimie plus élargi comme l'indique la figure 2.

Figure 2

*Triplet de la chimie révisé (Dumon & Mzoughi-Khadhraoui, 2014)*



De façon plus globale, pour une meilleure compréhension des concepts chimiques, l'apprenant doit expliquer les changements qu'il observe au niveau macroscopique à l'aide du modèle particulaire qui, à son tour, est représenté par des symboles et des formules chimiques (Chandrasegaran et al., 2007 ; Dumon & Mzoughi-Khadhraoui, 2014 ; Gilbert & Treagust, 2009 ; Johnstone, 1982). Malheureusement, plusieurs études en didactique de la chimie indiquent que les élèves éprouvent des difficultés considérables à comprendre les représentations sub-microscopiques et symboliques utilisées en chimie, car ces deux niveaux sont abstraits et ne peuvent pas être expérimentés (Chandrasegaran et al., 2007 ; Cormier, 2014 ; Gilbert & Treagust, 2009 ; Talanquer, 2011). De plus, dans le processus enseignement-apprentissage de la chimie, ces représentations sont extérieures, parfois imposés aux apprenants et ils n'ont pas toujours l'occasion de l'imaginer par eux-mêmes. Or, d'après Gilbert et Treagust (2009), la compréhension des élèves en chimie dépend de leur capacité à donner un sens à l'invisible ou à l'intouchable.

En outre, les difficultés d'apprentissage liées aux niveaux de représentations des savoirs en chimie sont aussi dues aux faits que les apprenants n'arrivent pas à établir des liens entre le domaine macroscopique, le domaine sous-microscopique et le domaine symbolique (Cormier, 2014 ; Halloun, 2019), ni à se déplacer entre ces trois niveaux (Gilbert & Treagust, 2009). De plus, les apprenants en dehors d'avoir une gamme d'idées fausses sur

la nature particulière et discontinue de la matière (Novick & Nussbaum, 1981), ils ne comprennent pas les conventions langagières et symboliques complexes utilisées dans le niveau symbolique de la représentation des savoirs chimiques (Dehon & Snauwaert, 2015 ; Gilbert & Treagust, 2009).

D'autres recherches (Cardellini, 2012 ; Dumon & Mzoughi-Khadhraoui, 2014 ; Gilbert & Treagust, 2009 ; Ouasri & Ravanis, 2020) identifient plutôt les enseignants qui n'intègrent pas dans leur pratique les niveaux des représentations, mais se déplacent entre ces niveaux de représentation sans souligner leur interdépendance aux apprenants, comme origine des difficultés d'apprentissage des concepts chimiques. Ainsi, ces pratiques enseignantes en chimie n'aident pas les apprenants à établir les liens entre les niveaux de représentation en chimie. Or, les recherches supra mentionnées indiquent aussi qu'il est très important d'aider les apprenants à établir les liens entre ces niveaux de représentation pour favoriser une bonne compréhension et conceptualisation des notions chimiques. Malheureusement, la problématique fondamentale en didactique de la chimie à laquelle plusieurs chercheurs peinent à trouver une réponse adéquate demeure. Il s'agit de comment faire pour engager les apprenants, sans toutefois oublier les enseignants, dans une véritable démarche de construction de connaissances conceptuelles.

Mais en didactique de la chimie, l'intégration par les enseignants dans leur pratique des niveaux de représentation des savoirs chimiques ne résout pas entièrement le problème d'apprentissage des concepts. Chandrasegaran et al., (2007) et Gilbert et Treagust (2009) ont montré dans leurs différentes recherches que les difficultés d'apprentissage liées aux multiples domaines de savoirs en chimie se complexifie davantage à cause du fait que les apprenants arrivent dans les cours des sciences physiques et plus particulièrement celui de la chimie avec leurs propres conceptions (préconceptions) sur des phénomènes ou des concepts à étudier. Et dans la plupart des cas, ces conceptions, qui seront présentées dans la sous-section suivante, sont en décalage avec les conceptions scientifiques qu'on veut leur faire acquérir.

### **2.3. Difficultés d'apprentissage en chimie liées aux conceptions alternatives**

L'importance des recherches sur les conceptions des élèves et des enseignants ainsi que leur rôle dans l'enseignement et l'apprentissage des sciences n'est plus à démontrer. Ce champ de recherche est devenu l'un des domaines les plus importants dans la didactique des

sciences où pendant plus de trois décennies, les chercheurs ont étudié les conceptions des élèves en physique, en chimie et en biologie (Astolfi et al., 2008 ; Treagust & Duit, 2009).

D'après Potvin (2018) : « *les conceptions sont des représentations mentales que les individus créent ou entretiennent à propos de ce que les choses sont ou de ce qu'elles font, pour les soutenir dans leur compréhension du monde* » (p. 240). Pour Potvin, bien que ces représentations mentales ressemblent aux conceptions scientifiques en tentant de rendre compte de la structure du monde où son détenteur évolue, elles diffèrent parfois très profondément des connaissances scientifiques, puisque leur construction s'est faite au niveau individuel, local, et dans l'immédiateté sans se soucier de l'exactitude des faits observés. À son époque, Gaston Bachelard attirait déjà l'attention sur ce sujet en ces termes : « *Le réel n'est jamais ce qu'on pourrait croire, mais il est toujours ce qu'on aurait dû penser* » (Bachelard, 1967, p. 16). Cela demeure un problème fondamental de la recherche en didactique des sciences qui est justement celui de ne pas avoir pu donner à l'élève la possibilité à penser le réel. Elle se contente de lui dicter ce qu'il doit penser du réel, et s'étonne qu'il ne trouve aucun goût dans son apprentissage dans ce domaine.

Dans le domaine de la didactique des sciences, plusieurs chercheurs ont montré que les conceptions d'origines individuelles sont parfois partiellement ou totalement érronées, car lorsqu'elles sont impliquées dans un projet d'apprentissage, elles entrent, dans la majorité des cas, en opposition avec le savoir scientifique visé. D'où l'appellation de conceptions érronées ou alternatives attribuées à ces dernières (Potvin, 2018) que nous allons adopter tout au long de cette thèse, car elle reflète l'opposition à la conception scientifique sans toutefois discréditer la valeur intellectuelle du raisonnement de l'élève (Malenfant-Robichaud, 2018).

À cet égard, plusieurs chercheurs en didactique ont tenté d'identifier plusieurs de ces conceptions. Mais, du fait de leur diversité et de leur spécificité, Potvin et bien d'autres chercheurs en didactique suggèrent de s'intéresser aussi à l'identification de leur origine afin de surmonter les difficultés d'apprentissages qu'elles causent aux apprenants. Dans le domaine d'enseignement-apprentissage de la chimie, les recherches sur les conceptions ont montré que de nombreux apprenants, à tous les niveaux d'enseignement, ont des conceptions alternatives sur les concepts de base de chimie même après plusieurs années d'études dans ce domaine (Duit, 2009 ; Thouin, 2016 ; Tümay, 2016).

Cependant, dans le contexte international, plusieurs de ces recherches se sont plus centrées sur la nature particulière de la matière, la masse atomique, la mole, les liaisons chimiques, les équations chimiques, l'équilibre chimique et la dissolution qui sont fondamentaux dans l'apprentissage de la chimie (Agogo & Omagbu, 2014 ; Calyk et al., 2005 ; Chandrasegaran et al., 2007 ; Cormier, 2014 ; Garnett et al., 1995 ; Ouasri & Ravanis, 2020 ; Potvin, 2018 ; Quílez, 2019 ; Treagust & Duit, 2009 ; Willame , 2017). Dans le contexte camerounais, la situation est quasi-identique. Car, les recherches menées sur ce sujet (Ambomo, 2022 ; Awomo Ateba, 2022 ; Ayina Bouni, 2013 ; Ayina Bouni & Awomo Ateba, 2019 ; Ayina Bouni et al., 2012 ; Ayina Bouni et al., 2021) ce sont, elles aussi, centrées exclusivement sur l'équilibre chimique, l'oxydoréduction, les concepts élémentaires de la chimie (atome, molécule, atomicité d'une molécule) et la chaleur pour ne citer que ces derniers.

Ainsi, il ressort de ces différentes études que plusieurs de ces conceptions alternatives sont les résultats des facteurs tels que :

- les élèves qui ne maîtrisent pas le langage scientifique qui est dans la plupart de cas différent du langage familier de la vie courante ;
- les idées et expériences personnelles antérieures des élèves ainsi que leurs antécédents culturels ;
- les élèves qui n'ont pas acquis les concepts scientifiques de base avant les activités d'apprentissage qui nécessitent la mobilisation de ces derniers ;
- l'enchevêtrement des concepts scientifiques ;
- l'application des concepts scientifiques qui ne sont plus adaptés à un contexte particulier donné ;
- l'existence de nombreuses définitions, modèles et théories scientifiques déroutantes pour les apprenants dans les manuels et dans la vie quotidienne des apprenants ;
- l'interaction des élèves avec leurs pairs et des médias de masse ;
- les représentations incorrectes de certains concepts dans les manuels scolaires et l'enseignement en classe ;
- l'incapacité des apprenants à considérer plusieurs données microscopiques ensemble pour comprendre les modèles des interactions, entre les entités qui constituent la matière, proposés par les experts ;
- les enseignants qui n'ont pas opéré de changement conceptuel sur certains concepts tout au long de leur cursus et, involontairement, il continue de transmettre les idées

erronées aux élèves. Ce dernier facteur a également été relevé au niveau universitaire camerounais par Belinga Bessala (2010) à la suite des enquêtes qu'il a menées dans cet ordre d'enseignement et qui révèlent que bon nombre d'enseignants enseignent ce qu'on leur avait enseigné quand ils étaient apprenants et ils enseignent également des connaissances obsolètes.

La plupart des causes supra mentionnées, qui sont à l'origine des conceptions alternatives en chimie, sont aussi communes aux sources des difficultés d'apprentissage identifiées dans d'autres disciplines scientifiques comme la physique et la biologie. Mais la chimie se démarque de ces disciplines par le fait que les apprenants ne sont pas en contact direct, avant l'enseignement, avec de nombreuses notions chimiques à conceptualiser (Taber, 2001). Par conséquent, ils arrivent en classe avec moins de préconceptions que dans les autres disciplines scientifiques (Cormier, 2014 ; Ouasri & Ravanis, 2020). À ce sujet, la tâche liée au problème d'apprentissage n'est pas pour autant simplifiée, car l'école, c'est-à-dire l'enseignement antérieur et le matériel didactique (livres) deviennent la principale source de contamination conceptuelle (Potvin, 2018) et le point d'ancrage des conceptions alternatives.

Un des exemples illustratifs de cette contamination conceptuelle par l'école en lien avec la concentration chimique est fourni par Willame et Snauwaert (2016) lorsqu'ils ont confronté les conceptions d'élèves du primaire, du secondaire et de l'université sur la dissolution du sel de cuisine dans l'eau à travers la situation suivante :

*Tu as devant toi deux tubes à essai : le premier contient du sel de cuisine et l'autre contient de l'eau dont le niveau est marqué par un trait. Si la totalité du sel était versée dans l'eau et qu'après-agitation de la solution, le sel était totalement dissout, que ferait le niveau de liquide : il resterait identique, il monterait ou il baisserait ? Explicite ton choix. (Willame & Snauwaert, 2016, p. 18)*

La bonne réponse à la question est : le niveau du liquide monterait. Mais les résultats qu'ils ont obtenus sont surprenants. 91 % des jeunes élèves du primaire (6-7 ans) formulent cette bonne réponse sans trop de difficultés contre 47 % des élèves du primaire (11-12 ans), 37,5 % des élèves secondaires (15-16 ans) et 34,5 % des étudiants universitaires qui, à leur tour, la formulent péniblement beaucoup moins bien. Une des causes que Bénédicte Willame et Philippe Snauwaert ont identifiées dans les justifications fournies par les élèves de plus de 11 ans qui n'arrivent pas à répondre correctement à la question est la prédominance, chez

ces derniers, d'une conception selon laquelle : « *Le sel va combler l'espace entre les molécules d'eau, générant un volume total moins grand que la somme des volumes* » (Willame & Snauwaert, 2016, p. 20). Malheureusement, cette conception, qui n'est pas pertinente dans ce contexte, a été probablement induite par des expérimentations précédemment faites en classe de science et portant sur les mélanges « eau-alcool » où elle est pertinente. Or, ces manipulations visent tout simplement à prouver la nature discontinue de la matière, en élaborant des modèles qui montrent comment les molécules d'eau viennent combler les interstices qui existent entre les molécules d'alcool, justifiant le fait que le mélange des deux (eau + alcool) donne un volume moins important que la somme arithmétique des deux volumes (Potvin, 2018). Hélas ! Les élèves ont étendu cet apprentissage au cas du mélange « sel-eau » où il ne marche pas. Le mal est fait comme le dit si bien Patrice Potvin. Ces chercheurs ont aussi décelé un point commun chez la quasi-totalité d'élèves de plus de 11 ans qui ont échoué à la question. Il s'agit de l'utilisation du langage chimique qui fait référence aux multiples modèles chimiques dans leurs justifications démontrant ainsi que c'est l'enseignement antérieur qui est responsable des contre-performances observées que Potvin (2018) a appelé « reculs conceptuels ». Bien que cette désignation reste discutable en didactique de la chimie, ces résultats montrent également que la chimie, bien qu'elle soit une science de la modélisation, ses modèles restent dans d'autres cas peu prédictifs.

Dans la même lancée, Talanquer (2006, 2014) et Gilbert et Treagust (2009) avaient identifié le raisonnement basé sur le sens commun et les heuristiques (procédures de raisonnement raccourci) comme d'autres sources des conceptions alternatives en chimie. Pour ces chercheurs, bien que les heuristiques soient parfois efficaces dans certains contextes, si les élèves ne parviennent pas à identifier les limites de ces raisonnements raccourcis et les suppositions empiriques qu'ils utilisent en fournissant moins d'effort cognitif pour conceptualiser les phénomènes chimiques, cela peut conduire aussi à la création des conceptions alternatives chez ces derniers. Dans ce cas particulier, les conceptions alternatives ne sont pas causées par l'enseignement formel, mais plutôt par la reconstruction du raisonnement dans la tête des apprenants, à l'issue d'un enseignement formel (Cormier, 2014).

Confrontée à ces particularités de la chimie, la compréhension des concepts chimiques est donc une préoccupation essentielle dans l'enseignement de la chimie. Ainsi, pour viser dans l'enseignement de la chimie un apprentissage efficace des concepts, une attention



particulière doit être portée sur les conceptions alternatives qui sont à l'origine des difficultés d'apprentissage des élèves ainsi qu'à leur origine. Il s'agit principalement des conceptions liées au langage, aux heuristiques, au sens commun de raisonnement et aux trois registres du savoir que sont le macroscopique, le sous-microscopique et le niveau symbolique, aux intuitions, à l'enseignement lui-même pour ne citer que ces dernières. Nous devons également développer et implémenter les stratégies pédagogiques qui amènent l'enseignement à ne pas être la source des conceptions alternatives, mais soit plutôt celui qui amène les apprenants à remettre en question leurs conceptions alternatives ou à renoncer de les utiliser dans les contextes où elles ne sont plus pertinentes. Cette démarche pourrait les aider à développer des conceptions scientifiquement plus acceptables sur les concepts de la chimie. À cet égard, nous présumons que si une telle démarche est adoptée, la conceptualisation d'une notion de base de la chimie comme la concentration chimique sera moins ardue pour les élèves.

### **3. Apprentissage du concept de concentration chimique**

Le concept de concentration chimique occupe une place très importante dans la compréhension de certains phénomènes scientifiques. Par exemple, l'interprétation de la plupart des processus biologiques et de nombreuses réactions chimiques qui se produisent entre les substances dissoutes pour former des mélanges ou des solutions homogènes (Raviolo et al., 2021). Pour le faire, il faut avoir une connaissance profonde non seulement des aspects qualitatifs, mais aussi des aspects quantitatifs des solutions qui sont étroitement liés à la concentration chimique. Cela montre que la concentration chimique n'intervient pas seulement en chimie, mais aussi dans d'autres domaines scientifiques tels que la biologie, la médecine, la physique...

Plus spécifiquement en chimie, la concentration chimique est « *une grandeur qui indique la quantité de soluté présente dans une quantité de solution donnée* » (Chang et Goldsby, 2014, p. 30). La concentration chimique est une grandeur intensive, car elle ne dépend pas de la taille du système et elle ne s'additionne pas aussi lorsque nous mélangeons les solutions contrairement aux grandeurs extensives telles que la masse, le volume, la quantité de matière, etc., qui à leur tour, vont s'additionner lors de cette opération. L'unité la plus utilisée dans les laboratoires scientifiques pour exprimer quantitativement la composition des solutions préparées et manipulées est la concentration molaire volumique (mol/L) comme nous allons le montrer plus tard au niveau du cadre conceptuel de cette étude.

En-dehors de la préparation des solutions, la concentration chimique est aussi mobilisée lors de la résolution de certaines tâches en stœchiométrie, en dosage acido-basique ou d'oxydoréduction, en cinétique chimie, en équilibre chimique, en électrochimie ou lors du calcul de pH d'une solution par exemple. Dès lors, une meilleure compréhension de la concentration chimique est très importante, puisqu'il s'agit d'un concept fondamental et opérationnel en chimie tant au niveau secondaire qu'au niveau universitaire. Si la concentration chimique n'est pas véritablement conceptualisée par les apprenants, ces derniers éprouveront des difficultés considérables dans la résolution des situations conceptuellement problématiques qui nécessitent sa mobilisation quel que soit le domaine d'étude. C'est la raison pour laquelle dans la sous-partie suivante, nous allons examiner la transposition de la concentration chimique dans les curricula réels et formels<sup>4</sup> du Cameroun pour voir si elle est susceptible de faciliter son apprentissage auprès des apprenants.

### 3.1. Transposition didactique du concept de concentration chimique

Le concept de transposition didactique qui est de nos jours fondamental dans le processus enseignement-apprentissage dans tous les domaines d'apprentissage a été créé par le sociologue Michel Verret<sup>5</sup> en 1975 (Astolfi et al., 2008). Il est introduit pour la première fois en didactique et plus précisément en didactique des mathématiques par Yves Chevallard. Il écrit à ce sujet :

*Un contenu de savoir ayant été désigné comme savoir à enseigner subit dès lors un ensemble de transformations adaptatives qui vont le rendre apte à prendre place parmi les objets d'enseignement. Le "travail" qui d'un objet de savoir à enseigner fait un objet d'enseignement est appelé la transposition didactique. (Chevallard et Johsua, 1991, p. 39)*

---

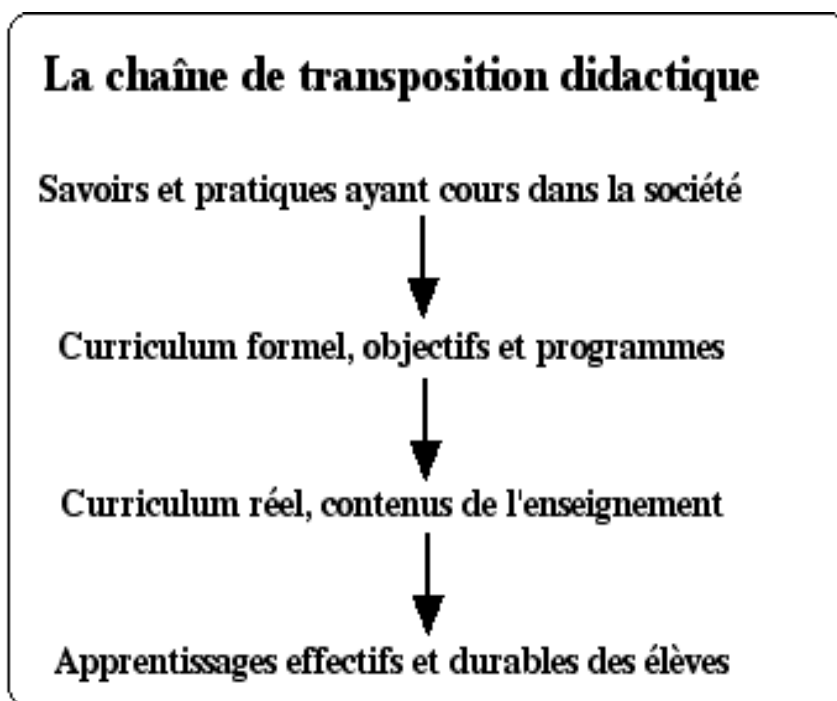
<sup>4</sup> Dans un système éducatif, le **curriculum formel** désigne l'ensemble des lois, décrets ou circulaires qui assignent les buts à l'instruction publique en définissant les contenus des programmes qui sont censés être enseignés et appris dans les divers degrés ou cycles d'études des diverses filières, ainsi que les méthodes recommandées ou imposées pour les faire. Alors que le curriculum réel désigne, à son tour, ce qui est réellement enseigné et pratiqué (Perrenoud, 1993).

<sup>5</sup> Michel Verret (1927-2017) était un philosophe et sociologue français. Il a utilisé pour la première fois le concept de transposition didactique dans son livre intitulé : « Le temps des études » paru en 1975 aux éditions Honoré Champion. Pour Verret, la transposition didactique se caractérise par : la désyncrétisation du savoir, c'est-à-dire la division de la pratique théorique en champs de savoirs délimités donnant lieu à des pratiques d'apprentissages spécialisés ; la dépersonnalisation du savoir, c'est-à-dire la séparation du savoir et de la personne ; la programmabilité de l'acquisition du savoir ou la programmation des apprentissages et des contrôles suivant des séquences raisonnées pour faciliter une acquisition progressive des connaissances ; la publicité du savoir et le contrôle social des apprentissages.

D'après Chevallard et Johsua (1991), la transposition didactique est donc un travail ou une opération qui consiste à designer un contenu de savoir comme savoir à enseigner qui va subir, à son tour, un ensemble de transformations adaptatives pour le rendre apte à prendre place parmi les objets d'enseignement. Pour compléter cette définition, Perrenoud (1998) propose la chaîne de transposition didactique (figure 3) où il ajoute d'une part, en dehors des savoirs savants, les pratiques sociales de référence et d'autre part, l'apprentissage effectif et durable des apprenants.

**Figure 3**

*Chaîne de transposition didactique proposée par Perrenoud (1998)*



Dans cette chaîne, en allant du haut vers le bas, la première flèche indique la transformation des savoirs savants et des pratiques sociales en programmes scolaires que Perrenoud et Chevallard ont appelé respectivement curriculum formel ou prescrit et transposition didactique externe. La seconde flèche indique à son tour, la transformation des programmes en contenus effectifs de l'enseignement que Perrenoud et Chevallard ont respectivement nommé curriculum réel et transposition interne qui relève largement de la marge d'interprétation, voire de création des enseignants (Perrenoud, 1998). Enfin, la troisième et dernière flèche indique le processus d'apprentissage, d'appropriation, de construction des savoirs et des compétences dans l'esprit des élèves que Perrenoud a appelé apprentissages effectifs et durables des élèves.

Lorsque nous revenons dans le cadre de l'enseignement et de l'apprentissage de la chimie, Ayina Bouni (2013) et Willame (2017) proposent de faire une distinction entre la chimie du chimiste (les savoirs savants), la chimie à enseigner (le curriculum formel), la chimie enseignée (le curriculum réel) et la chimie apprise par les élèves ou la chimie de l'élève (les apprentissages effectifs). Nous nous intéressons dans le cadre de la présente étude à la chimie de l'élève. Ainsi, nous allons examiner dans la suite, comment lorsque les acteurs (formateurs et formés) entrent en jeu pour implémenter le dispositif de formation en chimie dans le contexte camerounais, la concentration chimique est transposée et apprise. Nous allons à cet effet identifier les écarts entre ce qui est prévu par les programmes et ce qui se fait vraiment en classe, c'est-dire ce qui est véritablement enseigné. Nous déterminerons également l'écart entre ce qui est enseigné et ce qui est appris par les élèves lors de la construction de ce concept.

### **3.1.1. Analyse de la transposition didactique du concept de concentration chimique dans les programmes de chimie du secondaire général**

Dans cette partie, nous allons examiner comment la concentration chimique est transposée dans les programmes officiels de chimie en vigueur dans les Collèges et Lycées du Cameroun au cours de l'année scolaire 2020-2021. Pour ce but, notre attention sera portée sur les programmes qui traitent la concentration chimique et les notions pivots indispensables pour sa conceptualisation. Plus particulièrement, il s'agit de décrire les recommandations pour leur transposition au cours du cursus. Le corpus desdits programmes est constitué ainsi qu'il suit :

- les programmes d'études des sciences des classes de 6<sup>ème</sup> et 5<sup>ème</sup> de l'Enseignement secondaire général (élèves de 11-14 ans) définis par arrêté n° 262/14/MINESEC/IGE du 13 août 2014 ;
- les programmes d'études de physique-chimie-technologie des classes de 4<sup>ème</sup> et 3<sup>ème</sup> de l'Enseignement secondaire général (élèves de 13-16 ans) définis par arrêté n° 419/14/MINESEC/IGE du 9 décembre 2014 ;
- les programmes d'études de chimie des classes de Seconde, plus particulièrement la classe de Seconde C, de l'Enseignement secondaire général (élèves de 15-17 ans) définis par arrêté n° 226/18/MINESEC/IGE du 22 août 2018 ;
- les programmes d'études de chimie des classes de Premières E, TI, C & D de l'Enseignement Secondaire Général définis (16-20 ans) par Arrêté n° 09/20/MINESEC du 20 janvier 2020.

L'analyse de la transposition didactique du concept de concentration chimique dans les programmes officiels de chimie du secondaire général camerounais révèle qu'il est introduit dès le début du premier cycle (élèves de 11 à 16 ans). Il intervient tout au long du cursus scolaire pour ceux des apprenants qui optent pour des séries scientifiques.

Dans les classes de sixième et cinquième, la concentration chimique est étudiée dans la discipline intitulée « sciences »<sup>6</sup>. Plus concrètement, la notion de concentration chimique doit être abordée dans le module II intitulé : « la matière : ses propriétés et ses transformations » qui est subdivisé, à son tour, en deux parties<sup>7</sup> pour une durée totale annuelle de cours de quatre heures pour les classes de sixième et deux heures pour les classes de cinquième.

En classe de sixième, la concentration doit être apprise lors de l'étude des propriétés et les caractéristiques de la matière (première partie du module) alors qu'en classe de cinquième, elle doit être abordée lors de l'étude des transformations de la matière (deuxième partie du module) comme l'indique l'extrait du programme de la figure 4.

---

<sup>6</sup> La discipline « sciences » dans le système francophone camerounais fait partie du domaine d'apprentissage des sciences et technologies. Ce domaine d'apprentissage intègre la Physique-Chimie-Technologie (PCT) et les Sciences de la Vie et de la Terre, l'Éducation à l'environnement, l'Hygiène et la Biotechnologie (SVTEEB). Elle est divisée dans les classes des 6<sup>ème</sup> et 5<sup>ème</sup> en six grandes parties ou modules. Elle a un volume horaire hebdomadaire de deux heures pour un coefficient de deux (c'est-à-dire noté sur 40 points lors de l'évaluation).

<sup>7</sup> La première partie est les propriétés et les caractéristiques de la matière et la deuxième partie est les transformations de la matière.

Figure 4

Concept de concentration dans le programme de sciences des classes de 6<sup>ième</sup> et 5<sup>ième</sup> au Cameroun

AGIR COMPETENT		RESSOURCES		
Catégories d'actions	Actions	Savoirs	Savoir faire	Savoir-être
Détermination des caractéristiques physiques et chimiques d'un corps. (Classe de 6 <sup>e</sup> )	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Lire et respecter les indications de conservation d'un produit alimentaire</li> <li>- Utiliser une balance ;</li> <li>- Mesurer et calculer le volume d'un corps donné ;</li> <li>- Utiliser le papier tournesol ou le papier pH</li> <li>- Préparer une solution de concentration massique donnée.</li> </ul>	<b>1- Les propriétés et les caractéristiques de la matière</b> 1.1 Etats physiques, formes, perméabilité, imperméabilité, solubilité, acidité, basicité ; 1.2 Température et état de la matière ; 1.3 Volume, masse, masse volumique, densité, concentration massique.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Mesurage et calcul de la masse et/ou du volume d'un corps ;</li> <li>• Détermination de la nature acide ou basique d'un liquide.</li> </ul>	Gestion judicieuse et responsable des produits et des biens usuels de consommation.
Lecture et exploitation des inscriptions sur des produits de consommation (Classe de 5 <sup>e</sup> )	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Interpréter et exploiter une notice explicative</li> <li>- Lire et interpréter un pictogramme</li> </ul>	<b>2- Les transformations physiques de la matière</b> 2.1 Transformations physiques de l'eau : vaporisation, condensation, solidification, liquéfaction, sublimation. Constance de la température lors du changement d'état. 2.2 Mélanges et corps purs : l'eau, l'air, les solutions (soluté, solvant, concentration).	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Séparation de mélanges hétérogènes et homogènes : décantation, distillation, tamisage, filtration, flottage</li> <li>- Mise en évidence de la constance de la température lors de la fusion de la glace.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Prudence face à un produit dont la qualité est douteuse.</li> <li>- Réflexe à lire les étiquettes et les notices des biens de consommation avant leur utilisation.</li> </ul>

Cet extrait montre que le concept de concentration chimique doit faire l'objet d'un apprentissage au niveau macroscopique, car nous constatons qu'aucun sous-thème n'est accordé exclusivement à son étude. Il est plutôt recommandé aux enseignants d'étudier avec les apprenants de niveau sixième, la concentration massique dans le but d'établir le lien entre la masse et le volume d'un corps liquide. Les enseignants par la même occasion doivent initier les apprenants à préparer les solutions à des concentrations massiques bien déterminées. Dans les classes de cinquième, la concentration chimique est définie de façon générale lorsque les enseignants étudient avec les apprenants les mélanges et les corps purs. Il ressort de ce qui précède que le nombre d'activités à mener lors du processus d'enseignement-apprentissage de la concentration chimique est important alors que le quota horaire alloué à cet effet semble insuffisant.

Dans les classes de quatrième et de troisième, le programme de PCT est divisé en quatre modules pour un volume horaire hebdomadaire de trois heures et un coefficient égal à trois (c'est-à-dire noté sur 60 points). Plusieurs notions comme la concentration chimique introduites au début de ce cycle d'enseignement doivent être approfondies. L'objectif visé est de doter les apprenants des connaissances fondamentales qui vont renforcer leurs capacités intellectuelles soit de poursuivre des études au second cycle, soit de s'insérer dans le monde du travail après une formation professionnelle. D'après ces curricula, le concept de concentration chimique doit faire l'objet d'un apprentissage plus approfondi en classe de troisième, car d'autres notions fondamentales de la chimie (quantité de matière, réaction chimique, équation-bilan, atome, molécule, ion...) qui sont nécessaires pour sa compréhension ont été introduites en classe de quatrième. Pour ce faire, il doit être abordé dans la partie des solutions aqueuses du module I intitulée « transformations chimiques et physiques » comme l'indique l'extrait du programme de la figure 5.

Figure 5

Concept de concentration dans le programme de PCT de la classe de 3<sup>ème</sup> au Cameroun

Agir compétent		RESSOURCES	
Catégories d'actions	Exemples d'actions	Savoir	Savoir-faire
Transformations chimiques et physiques	Réaliser l'électrolyse et la synthèse de l'eau	<b>5. Électrolyse et synthèse de l'eau</b> Définitions : électrolyse, synthèse, analyse.	- Écrire les équations –bilans de l'électrolyse et de la synthèse de l'eau ; -Réaliser l'électrolyse de l'eau, la synthèse de l'eau ;
	- Analyser une solution aqueuse ; - Réaliser les tests d'identification de quelques ions ;	<b>6. Les solutions aqueuses</b> 6.1. Définition : solution aqueuse, 6.2. Solutions aqueuses conductrices et non conductrices, 6.3. Életroneutralité ; 6.4. Dissolution des solides ioniques dans l'eau (Ca(OH) <sub>2</sub> , KOH, AgNO <sub>3</sub> , NaCl ,BaCl <sub>2</sub> ); 6.5. Concentration molaire d'un ion en solution, les ions dans les eaux potables, 6.6. Introduction de la notion de pH, papier indicateur de pH, indicateur acido-basique.	- Vérifier la conductibilité électrique d'une solution ; - Réaliser la dissolution d'un composé ionique (Ca(OH) <sub>2</sub> , NaCl) dans l'eau ; - Réaliser les tests d'identification des ions (Ca <sup>2+</sup> , Cl <sup>-</sup> , SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> , Na <sup>+</sup> , K <sup>+</sup> , H <sub>3</sub> O <sup>+</sup> , HO <sup>-</sup> ) ; - Écrire les équations-bilans de mise en solution ; - Distinguer nombre d'ions et nombre de charges ; - Identifier les ions contenus dans une eau minérale ou dans l'eau du robinet ; - Faire une analyse critique des étiquettes sur les produits de consommation, produits d'entretien ; - Calculer la concentration molaire d'un ion en solution connaissant la masse du composé ionique dissous et sa masse molaire ; - Déterminer le pH de solutions aqueuses usuelles (eau, soude, vinaigre, jus de citron, eau savonneuse, vin de palme) avec du papier pH ou les indicateurs colorés.

Cet extrait montre que dans les classes de troisième, le concept de concentration chimique est étudié principalement au niveau microscopique (concentration des ions en solution). Mais d'autres notions comme l'életroneutralité, la dissolution des solides ioniques dans l'eau, les ions, la mole et la relation entre la quantité de matière et la masse devraient être construites préalablement. Nous voyons ainsi la complexité de la conceptualisation de la concentration chimique au niveau microscopique. En outre, contrairement au curriculum de sciences des classes de sixième et de cinquième, le programme de PCT des classes de quatrième et de troisième accorde une partie entière du sous-thème à la notion de la concentration chimique. Il est recommandé aux enseignants qu'après avoir étudié avec les apprenants de ce niveau d'étude l'écriture des équations-bilans de mise en solution de



quelques composés ioniques<sup>8</sup>, de les initier au calcul de la concentration molaire d'un ion en solution connaissant la masse du composé ionique dissous et sa masse molaire.

Le programme camerounais de chimie de la classe de Seconde C se situe dans le prolongement de ceux du premier cycle que nous avons présenté précédemment. Il vise le même but que ces derniers à savoir : amener les apprenants à comprendre et expliquer les phénomènes naturels, à résoudre les problèmes que ces derniers posent dans leurs domaines de vie et de mettre en œuvre des processus d'acquisition des connaissances. Ce curriculum accorde à l'étude de la discipline « Chimie » un volume horaire hebdomadaire de trois heures pour un coefficient de trois (c'est-à-dire noté sur 60 points lors de l'évaluation) au niveau de cette classe. Soit soixante-douze heures en une année scolaire. Il est divisé en deux grandes parties ou modules. Dans ce programme, la notion de concentration est abordée dans le module II intitulé « les solutions aqueuses » d'après l'extrait du programme de la figure 6.

---

<sup>8</sup> Il s'agit principalement des solides ioniques tels que : l'hydroxyde de calcium ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ), l'hydroxyde de potassium ( $\text{KOH}$ ), le nitrate d'argent ( $\text{AgNO}_3$ ), le chlorure de sodium ( $\text{NaCl}$ ), le chlorure de baryum ( $\text{BaCl}_2$ ), etc d'après le programme de chimie en vigueur des classes de Seconde C.

Figure 6

Concept de concentration chimique dans le programme de chimie de la classe de 2<sup>nd</sup>e C au Cameroun

AGIR COMPÉTENT		RESSOURCES	
Catégories d'actions	Exemples d'actions	Savoirs	Savoir-faire
Détermination de la nature d'une solution	-Déterminer la concentration molaire d'une solution ; -Utiliser les effets thermiques de dissolution ;	-Dissolution dans l'eau des solides ioniques : exemples et définition de solutions ioniques - Rôle du solvant et effets thermiques :  - Grandeurs caractéristiques : concentrations massique et molaire, solubilité, saturation. -Électro neutralité d'une solution -dilution	Expérience : dissolution de solides ioniques, dilution, préparation de solutions.  Expérience : mise en évidence des effets thermiques. Expérience : solubilité et saturation.
Préparation de solutions	Réalisation d'une dilution  -Utiliser les propriétés acides d'une solution  -Utiliser des indicateurs colorés	<b>2 - Solutions acides, basiques et neutres.</b>  <b>2.1- Solutions aqueuses acides</b> - Chlorure d'hydrogène (gaz chlorhydrique) - Structure. - Propriétés physiques. - Acide chlorhydrique. - Ion hydronium. - Concentration molaire en ion hydronium. - Propriétés acides liées à l'ion hydronium - Réaction de caractérisation de l'ion chlorure. - Définition générale d'un acide d'après Bronsted	Expériences : Catégorisation de solutions À partir d'un indicateur coloré Identifier le caractère acide d'une solution.  -Mettre en évidence les propriétés de l'ion hydronium  - Écrire les équations-bilans des différentes réactions chimiques de

Lorsque nous examinons cet extrait du curriculum formel de chimie, nous constatons qu'il est recommandé d'aborder la notion de la concentration chimique au niveau macroscopique (concentration massique et molaire) et au niveau microscopique (concentration molaire des ions en solution). Or, au premier cycle, elle est abordée de manière distincte. Le niveau macroscopique dans les classes de niveaux sixième et cinquième et le niveau microscopique dans les classes de niveau troisième. De plus, tout comme dans le curriculum des classes de troisième, il est aussi recommandé dans celui de la Seconde C qu'avant d'aborder la concentration chimique comme une grandeur qui

caractérise une solution, les notions telles que la dissolution des solides ioniques dans l'eau, la solvation, la dilution, l'électroneutralité, la solubilité, etc., qui sont nécessaires pour sa conceptualisation, doivent être acquises. Par la suite, la concentration chimique doit être mobilisée dans le cas de dosage acido-basique pour calculer la concentration de la solution dosée en appliquant la relation de l'équivalence  $C_a V_a = C_b V_b$ . Avec  $C_a$  et  $C_b$  représentant respectivement la concentration de la solution acide et de la solution basique ;  $V_a$  et  $V_b$  les volumes de la solution acide et de la solution basique. La concentration chimique et d'autres concepts qui sont nécessaires pour son apprentissage et sa compréhension occupent une place très importante dans ce curriculum formel. Cela montre l'importance que les acteurs du système éducatif chargés d'élaborer ce programme accordent à ce concept dans l'apprentissage de la chimie à ce niveau d'étude.

Dans les classes de Première et de Terminale scientifiques (C, D, E et TI)<sup>9</sup> où nous avons les apprenants âgés entre 17-20 ans, les programmes de chimie sont dans le prolongement de celui de la classe de 2<sup>de</sup> C. Ces curricula accordent à l'étude de la discipline chimie dans ces classes, un volume horaire hebdomadaire de deux heures pour un coefficient de deux (noté sur 40 points). À la sortie de la classe de Terminale, l'élève doit être capable de poursuivre des études supérieures dans des filières où la chimie est présente ou de s'insérer dans le milieu professionnel. Lorsque nous avons parcouru et analysé ces curricula, fort est de constater qu'aucun thème ou sous-thème n'est consacré à l'approfondissement de l'apprentissage du concept de concentration chimique. Tout au contraire, ce concept doit plutôt être mobilisé lors du dosage d'oxydoréduction qui est un sous-thème d'études dans les classes de niveau Première C, D, E et TI où cette opération consiste à déterminer la concentration d'une solution donnée. De même, la concentration chimique doit également être mobilisée dans les classes de niveau Terminale C, D, E et TI lors des dosages acido-basiques et de l'étude cinétique de certaines réactions chimiques où il est question de montrer son influence sur la vitesse d'une réaction. Nous voyons une fois de plus, la place centrale que la concentration chimique occupe dans l'apprentissage de la chimie.

Pour compléter notre analyse curriculaire, nous allons dans la partie suivante, analyser les manuels scolaires de chimie qui sont au programme dans l'enseignement secondaire francophone camerounais. Cette analyse, qui n'est pas un diagnostic global de l'enseignement de la chimie au Cameroun, va se focaliser principalement sur la transposition

---

<sup>9</sup> Ce sont les classes de série C (mathématiques et sciences physiques), de série D (mathématiques et sciences de la vie et de la terre) et de série TI (mathématiques et sciences de l'information et la communication).

de la concentration chimique et de certaines notions centrales pour sa compréhension, dans les classes où elle est conceptualisée et mobilisée par les apprenants. Pour cela, il sera question pour nous de montrer comment la concentration chimique ainsi que ces notions sont transposées dans les manuels de chimie dans ces différentes classes en fonction des recommandations issues du curriculum formel que nous avons présenté précédemment.

### **3.1.2. Analyse de la transposition du concept de concentration chimique dans le curriculum réel de chimie de l'enseignement secondaire général**

La circulaire N° 002/CAB/PM signée par le Premier ministre le 23 novembre 2017 régissant la filière du livre, du manuel scolaire et autres matériels didactiques au Cameroun prescrit l'usage d'un manuel unique par discipline et par niveau d'étude. Le livre du professeur est le même que le livre de l'élève. Mais dans le processus d'enseignement-apprentissage proprement dit, l'utilisation du manuel scolaire par les apprenants est principalement guidée par l'enseignant. Elle se résume, presque toujours, au traitement des exercices qu'il sélectionne parmi les exercices présents à la fin de chaque leçon. Les manuels en vigueur sont conformes aux programmes officiels et à l'approche pédagogique prescrits. Ces manuels sont produits localement et à des standards et coûts adaptés au contexte camerounais (Awomo Ateba, 2022). Les auteurs de ces manuels sont, dans la plus des cas, des enseignants et les inspecteurs pédagogiques régionaux et nationaux qui sont d'ailleurs les concepteurs des programmes officiels pour certains. Dans cet environnement, l'analyse des manuels permet de comprendre le choix didactique des enseignants, puisque le manuel reflète plus les savoirs que les enseignants transposent et leurs différentes pratiques de classes (Awomo Ateba, 2022).

Au cours de la présente analyse, notre attention s'est plus focalisée sur les parties des manuels des niveaux troisièmes et Seconde C qui étudient la concentration d'une espèce chimique en solution. Il s'agit de :

- Collection DEWATEK en Physique - Chimie - Technologie 3<sup>ème</sup>, éditions TINCYD, parue en 2018 à Yaoundé ;
- Collection l'Excellence en Physique - Chimie 2<sup>nde</sup> C, éditions NMI EDUCATION, parue en 2019 à Yaoundé.

Ainsi, dans le manuel des classes de Seconde C qui nous donne une idée sur le curriculum réel de ce niveau d'étude, la concentration chimique est présentée comme une des grandeurs qui caractérisent la matière et plus particulièrement, une grandeur qui

caractérise la solution aqueuse comme le recommande le programme officiel. Mais bien avant, d'autres notions nécessaires pour sa compréhension sont abordées. Parmi ces notions, nous avons : la solvataion des ions, la dissolution, la dilution, l'équation chimique, les constituants de la matière (atome, molécule et ion) pour ne citer que celles-ci.

### ➤ **Concept de solvataion**

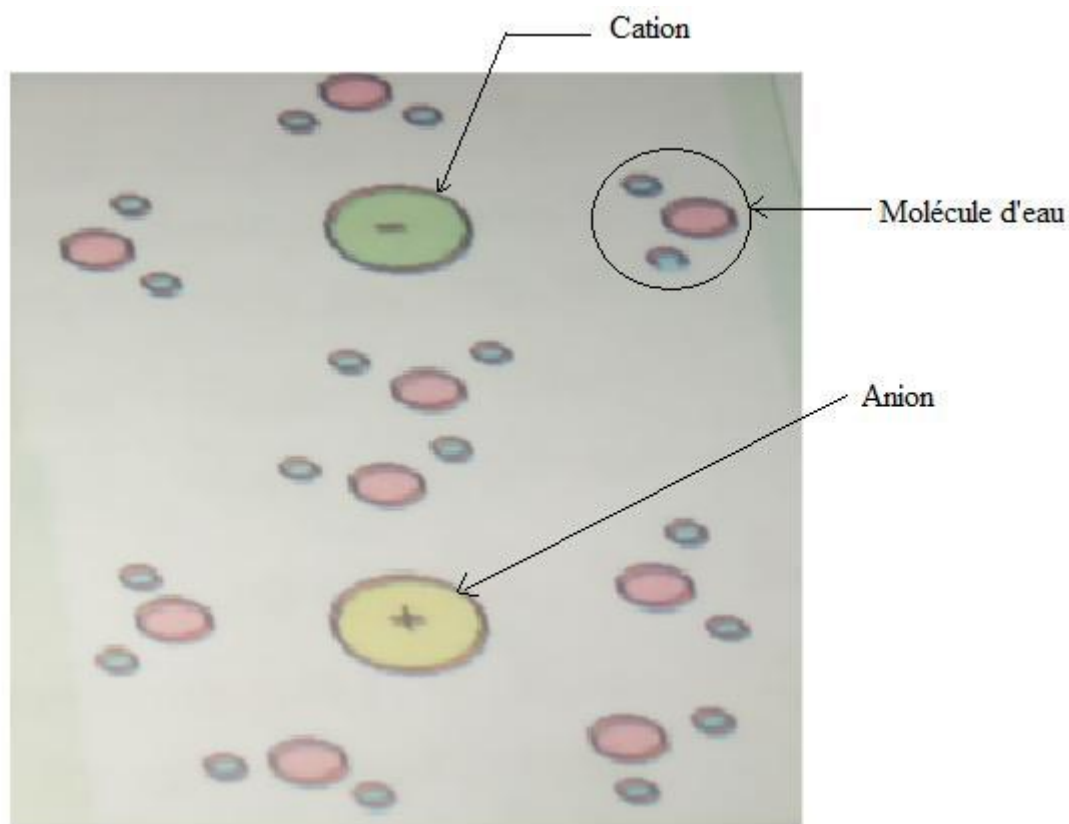
Rappelons tout d'abord que dans l'enseignement secondaire, le solvant le plus utilisé en chimie pour préparer les solutions est l'eau. C'est la raison pour laquelle nous utiliserons plus dans cette partie l'hydratation à la place de solvataion. Dans ce manuel (pp. 314-316) par exemple, la notion d'hydratation constitue la première séance de cours du module sur les solutions aqueuses comme le recommande le programme officiel de chimie de ce niveau d'étude. Cette séance débute par une activité où il est demandé à chaque apprenant d'expérimenter et de répondre aux questions suivantes :

- 1- *Prendre un morceau de sucre et le mettre dans l'eau puis agiter. Que constatez-vous ?*
- 2- *Mélange un peu d'eau avec de l'huile rouge et agiter. Que constatez-vous ?*
- 3- *Que peut-on dire du comportement de l'eau avec le sucre et avec l'huile ? »*

L'objectif de ces activités est de montrer le rôle du solvant (eau) dans la formation d'une solution. Après cette activité, un résumé est fait où premièrement, l'eau est présentée comme un solvant qui a un pouvoir d'hydratation très important même si ce n'est pas toutes les substances qui y sont solubles. Deuxièmement, pour une bonne compréhension de ce phénomène par les apprenants, une représentation iconographique du modèle chimique de ce phénomène est faite pour expliquer ce qui se déroule au cours de ce processus à l'échelle microscopique comme l'indique la figure 7.

**Figure 7**

*Représentation iconographique du modèle chimique de l'hydratation des ions dans le curriculum réel*



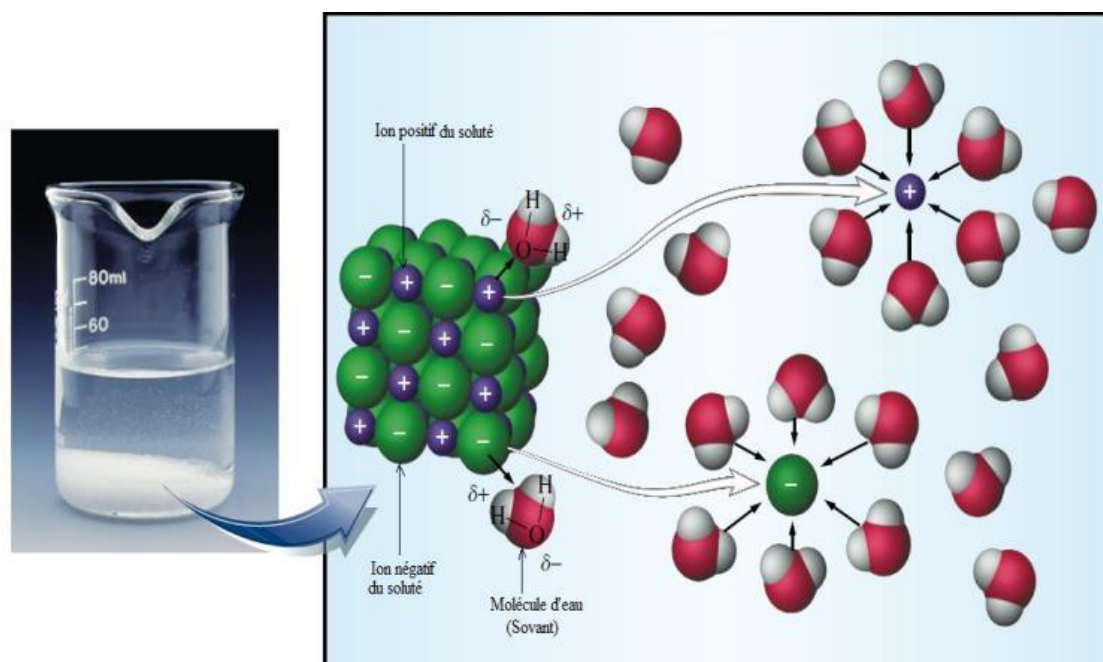
Cette représentation sous-entend que les cations (ions positifs) en solution sont attirés par les pôles négatifs des molécules d'eau et les anions (ions négatifs) par les pôles positifs. Mais lorsque nous examinons comment la notion de solvatation est transposée dans ce manuel, nous constatons que :

- dans l'activité proposée au début de la séance, l'hydratation des ions n'a pas été mise en évidence, car le sucre, constitué essentiellement des molécules de glucose, est un solide moléculaire et non-ionique. Sa dissolution dans l'eau donne plutôt une solution moléculaire. Or, pour une meilleure compréhension du phénomène d'hydratation des ions, nous pensons qu'il était plus judicieux qu'une autre partie de l'activité soit consacrée à la dissolution dans l'eau des solides ioniques comme le sel de cuisine par exemple ;
- de plus, la représentation iconographique du phénomène d'hydratation des ions proposée dans ce manuel ne facilite pas sa compréhension. Dans ladite représentation, les pôles et les liaisons chimiques sont omis dans le modèle éclaté de la molécule d'eau

utilisé, d'une part. D'autre part, les interactions entre les molécules d'eau et les ions ne sont pas matérialisées comme c'est par exemple le cas dans la modélisation de ce phénomène proposée dans la figure 8 par le chimiste Hill et ses collaborateurs en 2008.

### Figure 8

*Modèle chimique de l'hydratation des ions dans la dissolution d'un cristal ionique (Hill et al., 2008, p. 21)*



D'après le schéma de la figure 8, l'attraction qui existe entre les molécules d'eau polaires et les ions permet d'arracher ces derniers du réseau cristallin et de les entraîner en solution aqueuse. Les attractions ion-dipôles existent également dans la solution, ce qui diminue la tendance des ions à reformer le cristal et la combinaison ion-molécules d'eau polaires qui l'entourent et l'attirent est appelée ion hydraté (Hill et al., 2008) ;

- enfin, la situation est similaire, voire même plus prononcée dans les cours de chimie sur ce concept destinés aux apprenants, car dans la plupart de ces cours, la représentation iconographique de ce phénomène est quasi-inexistante.

Ces manquements, relevés dans ce manuel et cours destinés aux apprenants sur la solvation, peuvent consolider ou faciliter la construction des conceptions alternatives sur ce phénomène auprès de ces derniers. Or, pour déterminer la concentration d'une espèce chimique en solution, il faut au préalable savoir sous quelle forme (ionique ou moléculaire) elle s'y trouve.

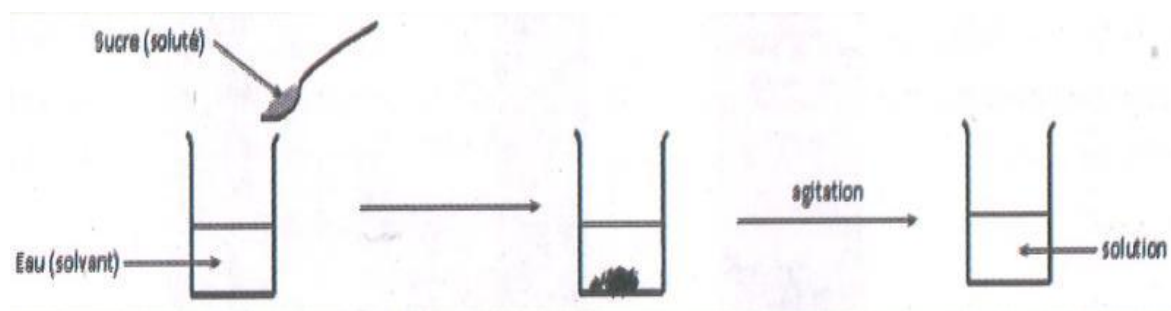
### ➤ Concept de dissolution

D'après le curriculum réel de chimie des classes de Seconde scientifique (C), la notion de dissolution est abordée directement après celle de la solvatation. Elle constitue la deuxième séance de cours sur les solutions aqueuses et seule la dissolution des solides ioniques dans l'eau est étudiée. Tout comme dans le cas de la solvatation, la séance débute aussi par une activité où il est demandé aux apprenants d'aider un patient à préparer une solution contenant une quantité importante de chlorure de sodium à partir du sel de cuisine pour faire un bain de bouche dans le but de soulager son mal de dents (pp. 316-317). L'objectif étant d'amener les apprenants à prendre conscience du phénomène de saturation d'une solution qui est le seuil au-dessus duquel la dissolution n'est plus possible rendant dès lors la détermination de la concentration impossible.

Après que l'activité soit menée, un résumé est fait où les définitions des concepts de solution, solvant, soluté, solution aqueuse ionique et solution aqueuse non-ionique sont proposées. Les étapes de la dissolution d'un solide ionique (dissociation, solvatation et dispersion) sont aussi données, suivi d'une illustration schématique de ce processus comme l'indique le schéma de la figure 9.

**Figure 9**

*Schématisation du processus de la dissolution du soluté dans l'eau dans le curriculum réel*



Pour terminer la séance, les équations équilibrées de dissolutions de certains solides ioniques sont données ainsi que le rôle du solvant et l'effet thermique dans le processus de dissolution. Mais après analyse des cours et du manuel portant sur le phénomène de dissolution destinée aux apprenants, plusieurs constats se dégagent :

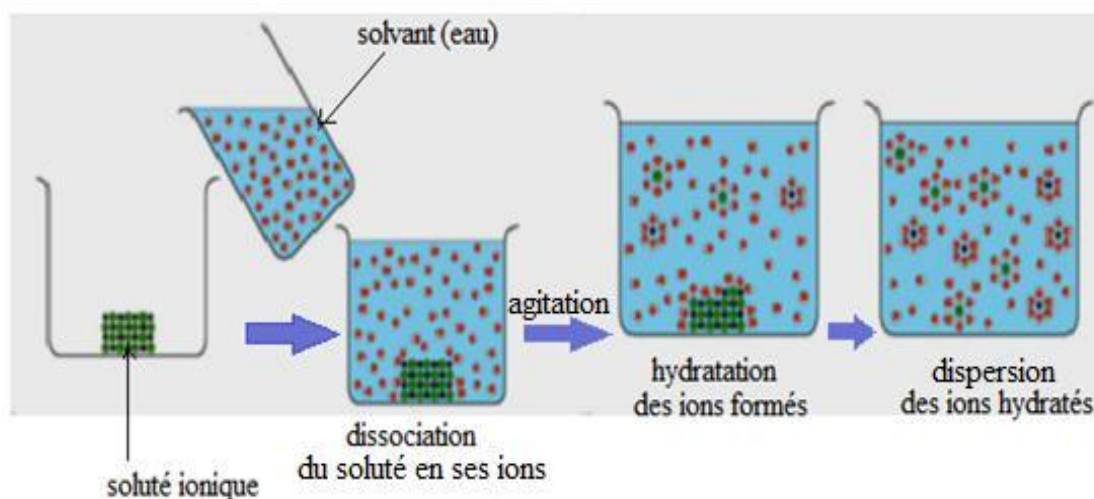
- la modélisation du phénomène de dissolution ainsi que celle de ses principales étapes ne peuvent vraisemblablement pas faciliter la compréhension de ce phénomène, car les particules de soluté ne sont pas matérialisées à l'échelle microscopique dans la solution finale obtenue. Cela peut contribuer à renforcer davantage chez certains



apprenants, la conception alternative selon laquelle le soluté disparaît et n'existe plus dans la solution finale après sa dissolution totale dans un solvant. Or, une bonne visualisation des étapes de la dissolution d'un composé chimique (ionique et moléculaire) à l'aide des modèles proposés par les chimistes peut mieux permettre aux apprenants de comprendre que lorsqu'un soluté est dissous dans un solvant, les particules qui le constituent sont bel et bien présentes dans la solution finale obtenue comme l'indique le schéma de la figure 10. Par conséquent, nous pouvons déterminer la concentration chimique de chacune d'elles en solution puisqu'elles y sont présentes.

### Figure 10

*Représentation iconographique du modèle chimique de dissolution d'un soluté ionique dans l'eau proposée par l'IUPAC (Willame & Snauwaert, 2016)*



Ce schéma, montre comment lors de la dissolution du solide ionique, comme le chlorure de sodium dans l'eau, le réseau cristallin est détruit par les molécules d'eau sous l'action des forces électrostatiques (dissociation). Ensuite, les ions formés sont progressivement entourés d'un cortège de molécules de solvant (eau) qui les isole les uns des autres (l'hydratation et dispersion des ions) grâce aux interactions « dipôles-charges » qui sont supérieures aux forces de cohésion entre les ions du réseau cristallin pour éviter la reconstitution de ce dernier. De plus, la place occupée par les ions du soluté dissous a fait augmenter le volume initial du solvant. Par conséquent, le volume de la solution finale obtenue sera supérieur au volume de solvant ;

- l'utilisation du verbe « disparaître » pour expliquer le phénomène de dissolution observable à l'échelle macroscopique peut également renforcer davantage la conception alternative selon laquelle les particules de soluté n'existent plus dans la

solution finale après sa dissociation totale dans un solvant. Cela ne facilite pas la compréhension de ce phénomène au niveau microscopique, et par conséquent, celle de la concentration d'une espèce chimique en solution qui est une dimension très importante de la concentration chimique en tant que grandeur qui caractérise une solution. La situation n'est guère plus satisfaisante dans les cours de chimie portant sur ce concept et destinés aux apprenants.

Toutes ces limites que nous venons de relever peuvent constituer des variables obstacles qui empêchent les apprenants et certains enseignants d'être conscients de la place qu'occupe le soluté dans la solution finale. Car ils n'ont pas une vision microscopique assez puissante du phénomène de dissolution. Par conséquent, la portion occupée par les particules de soluté dans la solution finale est négligée ou n'est pas prise en compte par les apprenants. D'où les difficultés qu'éprouvent les élèves à déterminer la concentration chimique et plus particulièrement, celle d'une espèce chimique en solution liée probablement au renforcement chez ces derniers de la conception alternative selon laquelle le soluté disparaît et n'existe plus dans la solution finale après sa dissociation totale dans un solvant. Or, plusieurs recherches en didactique de la chimie (Devetak et al., 2009 ; De Berg, 2012 ; Goes et al., 2020 ; Raviolo et al., 2021) rapportent que lorsque les apprenants ont accès aux représentations visuelles correctes en plus à un texte, il leur devient plus facile de comprendre les concepts présentés. De plus, puisqu'une grande partie des contacts des élèves avec la représentation visuelle du contenu est médiatisée par les manuels scolaires, ces recherches suggèrent aussi de veiller à ce que les représentations soient soigneusement faites, car la simple présence d'images dans les manuels ne garantit pas la compréhension d'un contenu. Il faut donc assurer la cohérence entre le texte et les images ; la cohérence entre les activités d'apprentissage et les phénomènes chimiques qu'on veut mettre en évidence lors de la modélisation des différents concepts.

➤ **La concentration chimique comme grandeur qui caractérise les solutions aqueuses**

Dans le curriculum réel de chimie des classes de Seconde scientifique, la grandeur concentration est abordée directement après l'étude de la solvataion des ions et de la dissolution des solides ioniques dans l'eau comme le recommande le programme officiel. Elle est étudiée dans la séance trois intitulée « grandeurs caractéristiques de solutions

aqueuses » où d'autres concepts tels que l'électroneutralité, la dilution et la solubilité sont aussi étudiés. La séance débute elle aussi par une activité formulée de la manière suivante :

*Prendre trois tasses de même capacité et y mettre respectivement : dans la première 25 cL d'eau et 12 g de sucre ; dans la deuxième 3,2 dL d'eau et 15 g de sucre et dans la troisième 0,15 L d'eau et 8 g de sucre.*

- 1- Quelles est la tasse la plus concentrée ?*
- 2- Comment pouvez évaluer le degré de « sucré » de chaque tasse ?*
- 3- Proposez un nom à cette grandeur qui représente le degré de sucre. (p. 319)*

Cette activité a pour but de faire construire par les apprenants le concept de la concentration chimique. Pour la résoudre, chaque apprenant doit maîtriser au préalable la conversion des unités de volume, car le volume n'est pas donné sur la même base à savoir, le litre (L).

Suite à cette activité, les définitions de la concentration massique et molaire sont proposées. Ces dernières se définissent dans ledit manuel et dans plusieurs cours destinés aux apprenants comme étant des grandeurs qui correspondent au rapport de la masse du soluté dissout par le volume total de la solution (concentration massique) et au rapport de la quantité de matière dissoute par le volume total de la solution (concentration molaire).

De plus, nous avons également noté que dans l'exemple d'institutionnalisation du concept de concentration molaire proposés dans le manuel des classes de Seconde C (p. 322), le choix de transposition selon lequel le volume de solution est délibérément confondu avec le volume de solvant est fait. L'extrait de la figure 11 est une illustration de ce mode de transposition où le volume considéré est celui du solvant (« 10 L d'eau ») et non celui de la solution d'après la définition de la concentration molaire.

**Figure 11**

Exemple d'exercice d'application sur le calcul de la concentration molaire dans le manuel Excellence des classes de Seconde C (p. 322)

**Exercice d'application :**

Calculer la concentration molaire d'une solution obtenue en dissolvant 0,12 L de chlorure d'hydrogène dans 10 L d'eau.

**Solution :**

$$C = \frac{n}{V} \text{ or } n = \frac{V_{\text{HCl}}}{V_m} \rightarrow C = \frac{V_{\text{HCl}}}{V_m \times V} ; \text{A.N: } C = \frac{0,12}{24 \times 10} = 5 \times 10^{-4} \text{ mol.L}^{-1}$$

Le choix de transposition où le volume de la solution est assimilé au volume du solvant est davantage automatisé au niveau des exercices de consolidation. L'exercice 5 de l'extrait de la figure 12 illustre clairement cette situation.

**Figure 12**

Exemple d'exercice sur le calcul de la concentration molaire dans le manuel Excellence des classes de Seconde C (p. 326)

**Exercice 5**

Calculer la concentration molaire pour chacune des solutions suivantes obtenues par la dissolution de :

1. 0,3 mol de NaOH dans 4 L d'eau.
2. 29,25 g de NaCl dans 250 mL d'eau.
3. 56 mL de gaz chlorhydrique dans les conditions normales dans 10 L d'eau

Nous relevons aussi le fait que dans ces manuels et certains cours de chimie, le volume occupé par le soluté dans la solution finale obtenue après sa dissolution totale dans l'eau est pris en compte dans certaines circonstances et pas dans d'autres. Par exemple, la question numéro deux de l'exercice deux dans le manuel Excellence en chimie pour les classes de Seconde C où il est demandé de : « calculer la concentration massique d'une solution contenant 5 g de chlorure de potassium dans 100 mL de solution » (p. 326). Ou encore, dans

l'exercice dix du manuel DEWATEK en Physique - Chimie - Technologie des classes de 3<sup>ème</sup> où il est demandé de : « *calculer la concentration massique du carbonate de sodium dans 250 mL de solution obtenue après dissolution de 5,30 g de cette substance dans l'eau* » (p. 50). Dans ces deux cas, le volume final de la solution est donné et non uniquement celui du solvant comme c'est le cas dans l'extrait de la figure 12. Cette situation où lors de la mobilisation de la concentration chimique, il est demandé aux apprenants d'utiliser tantôt le volume de la solution obtenue, tantôt le volume du solvant, alors qu'à part la molalité, la concentration chimique se rapporte au volume de la solution est susceptible de renforcer ou de créer chez l'apprenant la conception alternative selon laquelle le volume de la solution est assimilable à celui du solvant. Ladite conception qui a été déjà identifiée par Willame (2015, 2017) comme une source des difficultés qui entravent considérablement l'acquisition du concept de concentration chimique dans le contexte belge.

Enfin, dans ces manuels de chimie supra mentionnés, c'est plus le niveau macroscopique de la concentration chimique (concentrations massique et molaire des solutions) qui est principalement étudié au détriment du niveau microscopique (concentrations des espèces chimiques en solution). Or, le programme officiel recommande de l'aborder à partir de la classe de troisième, car les propriétés chimiques d'une solution sont dues à celles des espèces chimiques qu'elle contient et par ricochet, dépendent de leurs concentrations dans la solution. Malheureusement, dans cette classe le concept de la concentration d'une espèce chimique en solution est plutôt évoqué implicitement comme l'indique la figure 13.

Figure 13

Extrait d'un manuel DEWATEK en Physique - Chimie - Technologie des classes de niveau 3<sup>ème</sup> illustrant le calcul de la concentration d'un ion en solution (p. 44)

● **Dissolution du chlorure de sodium NaCl dans l'eau**

$$\text{NaCl}_{(s)} \longrightarrow \text{Na}^+_{(aq)} + \text{Cl}^-_{(aq)}$$

1 mole de NaCl dissout libère 1 mole d'ions  $\text{Na}^+$  et 1 mole d'ions  $\text{Cl}^-$ . La solution obtenue est électriquement neutre. Puisqu'on a dissout 585 mg soit 0,585 g de sel dans 100 mL (0,100 L),

(s) : état solide  
(aq) : ion entouré de molécules d'eau

alors la concentration molaire  $C$  de la solution de chlorure de sodium est le rapport de sa quantité de matière  $n(\text{NaCl})$  par le volume  $V$  de la solution :

$$C = \frac{n(\text{NaCl})}{V} \text{ or } n(\text{NaCl}) = \frac{m}{M(\text{NaCl})} \text{ alors } C = \frac{m}{M(\text{NaCl}) \cdot V} \text{ Soit } C = \frac{0,585}{58,5 \times 0,1} = 0,1 \text{ mol/L.}$$

La concentration des ions sodium  $\text{Na}^+$  ou des ions chlorure  $\text{Cl}^-$  est définie par

$$[\text{Na}^+] = \frac{n(\text{Na}^+)}{V} \text{ et } [\text{Cl}^-] = \frac{n(\text{Cl}^-)}{V}. \text{ En remarquant que}$$

$$n(\text{Na}^+) = n(\text{Cl}^-) = n, \text{ on a } [\text{Na}^+] = [\text{Cl}^-] = \frac{n}{V} = C.$$

Soit  $[\text{Na}^+] = [\text{Cl}^-] = 0,1 \text{ mol/L}$

Finalement  $[\text{Na}^+] = [\text{Cl}^-]$ . Cette dernière relation traduit l'équation d'électroneutralité de cette solution.

La concentration molaire d'un ion est  $[i] = \frac{n_i}{V}$

Dans cet extrait, l'expression mathématique de la concentration d'une espèce ionique est donnée sans que  $n_i$  qui est sa quantité de matière dans la solution ne soit clairement définie ou déterminée à partir de l'équation de dissolution. Or, dans le cas où la dissolution ou la réaction chimique ne se produiraient plus suivant la proportion 1/1<sup>10</sup> comme c'est le cas pour la dissolution dans l'eau du NaCl (voir figure 13), les coefficients stœchiométriques interviennent dans l'établissement du bilan des quantités de matière qui permet de calculer  $n_i$ . C'est le cas par exemple de la dissolution du sulfate de sodium dans l'eau où en solution, nous avons les ions sulfates et des ions sodiums en quantités non-égales. Dans ce cas, établir le bilan de la quantité de matière à partir de l'équation-bilan de dissolution pose d'énormes difficultés aux apprenants et il constitue un obstacle majeur à surmonter lors de la détermination de la concentration d'une espèce chimique en solution (Devetak et al., 2009 ;

<sup>10</sup> La proportion 1/1 en chimie signifie qu'une mole de substance ionique dissoute dans l'eau libère une mole de chaque type d'ion qu'elle renferme.

Grandillet & Le Maréchal, 2003). Mais, dans les classes de Seconde scientifique où nous nous attendons que ladite tâche ainsi que la concentration d'une espèce chimique en solution fassent l'objet d'un apprentissage profond comme le recommande le programme officiel de chimie, elles sont plutôt directement mobilisées pour établir la relation traduisant l'électroneutralité de la solution sans toutefois dire clairement à quoi elles renvoient comme l'indique l'extrait du manuel Excellence suivant :

*Considérons une solution aqueuse contenant les cations  $A^{a+}$ ,  $B^{b+}$ ,  $C^{c+}$ , ... ; et les anions  $X^x-$ ,  $Y^y-$ ,  $Z^z-$  ... ; l'équation traduisant l'électroneutralité de la solution s'écrit :  $a[A^{a+}] + b[B^{b+}] + c[C^{c+}] = x[X^x-] + y[Y^y-] + z[Z^z-]$ . Afin de respecter le principe d'électroneutralité d'une solution, on doit parfois ajouter des coefficients précisant la proportion de ses différents ions. Ainsi, la solution aqueuse de sulfate de potassium a pour formule  $(2K^+ + SO_4^{2-})$ , chaque ion sulfate portant deux charges (-) et chaque ion potassium une seule charge (+), la solution contient deux fois plus d'ions potassium que d'ions sulfates. La vérification de l'électroneutralité est donc un bon moyen pour vérifier les calculs de concentrations d'espèces en solution. (p. 323)*

Or, tout au long du cursus scolaire, la résolution de plusieurs exercices en chimie des solutions nécessite la mobilisation de la concentration d'une espèce chimique en solution par les apprenants. Une mobilisation qui est d'autant plus complexe lorsque la dilution intervient.

Tous ces manquements que nous venons de relever dans le curriculum réel de chimie en ce qui concerne la transposition de la concentration chimique et celle de certains concepts fondamentaux pour sa compréhension peuvent entraver considérablement sa conceptualisation par les apprenants.

### **3.1.3. Bilan de l'analyse de la transposition du concept de concentration chimique dans les curricula formels et réels de chimie de l'enseignement secondaire général camerounais**

L'analyse des programmes d'études de chimie de l'enseignement secondaire général camerounais montre que la grandeur concentration chimique est introduite dans le processus enseignement-apprentissage au début du premier cycle (classes de sixième et cinquième). Dans ces classes seul le niveau macroscopique (concentration d'une solution) est étudié. Le niveau microscopique (concentration d'une espèce chimie en solution) sera étudié plus tard dans les classes de troisième après que certains concepts qui entrent dans son réseau

conceptuel soient acquis. Il s'agit de la quantité de matière, la réaction chimique, l'équation-bilan, l'atome, la molécule, les ions, l'électroneutralité, la dissolution des solides ioniques dans l'eau, la mole et la masse molaire pour ne citer que ceux-ci. Par la suite, la concentration chimique interviendra tout au long du cursus pour les apprenants qui optent pour des séries scientifiques (C, D, E et TI). À cet effet, à partir de la Seconde C, l'apprentissage de la concentration chimique doit se faire simultanément au niveau macroscopique et au niveau microscopique, puis mobilisée dans certaines situations conceptuellement problématiques comme le dosage et la préparation des solutions. Cette mobilisation est d'autant plus significative lors de l'exécution de certaines tâches comme le dosage d'oxydoréduction, les réactions acido-basiques, la détermination de la vitesse d'une réaction en cinétique chimique et la stœchiométrie pour ne citer que celles-ci, tant au niveau de l'enseignement secondaire (Première et Terminale C, D, E et TI) que de l'enseignement universitaire.

La concentration chimique est donc une grandeur fondamentale et centrale dans les programmes d'étude en chimie. Elle constitue aussi un outil pour l'acquisition des autres concepts chimiques. D'où la nécessité d'une compréhension conceptuelle profonde de la concentration chimique au niveau macroscopique et au niveau microscopique qui va au-delà du simple maniement des formules et des nombres.

Pour mieux conceptualiser la concentration chimique comme une grandeur qui caractérise une solution, il faut au préalable avoir acquis certaines notions de bases de la chimie des solutions telles que l'hydratation des ions, la dissolution, mélange ou solution homogène, solvant, soluté, la dilution, l'équation chimique, les constituants de la matière (atome, molécule et ion), c'est-à-dire sa nature particulière, la stœchiométrie d'une réaction, la quantité de matière, la masse, le volume, etc. Plusieurs recherches en didactique de la chimie s'accordent sur le fait que l'imbrication conceptuelle autour de la concentration chimique rend son apprentissage difficile pour les apprenants (Adadan & Savasci, 2012 ; Calyk, 2005 ; Raviolo et al., 2021). C'est la raison pour laquelle, tout comme le programme officiel camerounais de chimie, ces recherches recommandent lors de la transposition de la concentration chimique et de son apprentissage, de prêter plus d'attention à certains aspects conceptuels à savoir :

- homogénéité de la solution tant au niveau macroscopique qu'au niveau microscopique. À cet égard, l'apprenant doit conceptualiser qu'après la dissolution totale d'un soluté dans un solvant, ses particules (ions, molécules) ne disparaissent pas dans la solution obtenue, mais elles sont plutôt uniformément réparties dans tout le



volume de la solution. Par conséquent, la concentration sera la même en tout point de la solution ;

- le volume qu'occupe le soluté dans le volume final de la solution. L'apprenant doit aussi comprendre que la définition de la concentration chimique se rapporte à la quantité de soluté par unité de volume de solution, et non pas par unité de volume de solvant en dehors de la molalité ;
- la concentration chimique est une propriété intensive d'une solution. L'apprenant doit conceptualiser que la solution étant un mélange homogène, sa concentration chimique est une propriété constante quelle que soit la taille du système considéré. Si, par exemple, une petite quantité de solution est retirée, le reste a toujours la même concentration. Par contre, la masse de soluté, la quantité de matière et le volume de la solution dont dépend la concentration chimique sont des variables extensives. Elles s'additionnent lors des mélanges des solutions contrairement à la concentration chimique et bien d'autres grandeurs intensives comme la pression et la température ;
- la proportionnalité de la grandeur concentration chimique. L'apprenant doit comprendre que la concentration chimique est directement proportionnelle à la quantité de soluté à volume constant de solution, et est inversement proportionnelle au volume de solution à quantité de soluté constante ;
- la dilution. L'apprenant doit conceptualiser que la concentration de la solution diminue avec l'ajout de plus de solvant à quantité de soluté constante, et augmente aussi avec l'évaporation du solvant à quantité constante de soluté ;
- le niveau microscopique de la concentration chimique. L'apprenant doit connaître établir le bilan de la quantité de matière en prenant en compte les coefficients stœchiométriques présents dans l'équation-bilan lors de la détermination de la concentration d'une espèce chimique en solution.

Malheureusement, le bilan de ces analyses révèle que la transposition de la concentration chimique et celle de certains concepts clés qui sont primordiaux pour sa construction sont problématiques. Un état de fait qui peut fortement contribuer à la création ou au renforcement des conceptions alternatives qui sont à l'origine des difficultés d'apprentissage que les élèves éprouvent lorsqu'ils conceptualisent ou mobilisent la concentration chimique. Ces difficultés deviennent de plus en plus considérables lorsque les élèves doivent résoudre les situations conceptuellement problématiques qui impliquent le concept de concentration chimique et sa trame conceptuelle quel que soit leur niveau selon

un constat fait en tant qu'enseignant des sciences physiques (chimie, physique et technologie) dans les Lycées et Collèges du Cameroun. Ce constat est appuyé par plusieurs recherches menées dans divers milieux à travers le monde (Adadan & Savasci, 2012 ; Calyk, 2005 ; Calyk et al., 2005 ; De Berg, 2012 ; Gandillet & Le-Marechal, 2003 ; Raviolo et al., 2021 ; Willame & Snauwaert, 2015 ; Willame, 2017) lorsqu'elles ont fait le bilan des acquis des apprenants sur la concentration chimique et sur certains concepts de la chimie des solutions.

### **3.2. Difficultés et conceptions alternatives connues dans l'apprentissage de la concentration chimique**

Vu l'importance opérationnelle de la concentration chimique d'une solution dans plusieurs domaines d'études expérimentales, nous constatons que les recherches sur les difficultés de son apprentissage sont très peu nombreuses comparativement à d'autres concepts étudiés dans le domaine de la recherche en didactique de la chimie. Ce constat a été déjà fait bien avant nous par Willame (2017) et Raviolo et al. (2021) lorsqu'ils se sont penchés sur ce sujet. Cependant, pour étudier les difficultés liées à l'apprentissage de la concentration chimique d'une solution, plusieurs recherches didactiques se sont plus centrées sur les difficultés des apprenants liées à la nature des solutions et au processus de dissolution qui relèvent de l'aspect qualitatif des solutions, plutôt que de l'aspect quantitatif de ces dernières.

Par exemple, lorsque Calik (2005) a soumis 441 élèves turques de 7<sup>e</sup> à la 10<sup>e</sup> année (âgés entre 13-17 ans) à un test papier-crayon pour évaluer leur compréhension sur la chimie des solutions, il a observé que pour l'item 4 qui était une question ouverte sur la concentration de la solution, plus de 80 % des élèves interrogés propose des réponses fausses lorsqu'on leur a demandé de comparer la solution du bécher A constituée d'un morceau de sucre dissous dans l'eau à celle du bécher B constituée de deux morceaux de sucre dissous. De plus, Calik a aussi constaté que parmi les élèves qui ont proposé des réponses acceptables, aucun d'eux n'est parvenu à identifier que la solution dans le bécher B était deux fois plus concentrée que celle dans le bécher A. Ils raisonnent plutôt en termes de dilution à savoir : la solution dans le bécher A est diluée par rapport à la solution dans le bécher B pour aboutir à la bonne réponse.

Devetak et al., (2009) ont entrepris une étude similaire en Slovénie auprès de 408 élèves (âgés de 16 ans) d'écoles secondaires en leur demandant dans les questions 9 et 10

qui portaient sur la concentration chimique, de représenter les images microscopiques de particules de soluté de trois solutions à égal volume, mais de concentration différente et de trois autres solutions ayant les volumes et les concentrations différents. Les résultats obtenus par Devetak et ses collaborateurs montrent que moins de 43 % des élèves interrogés ont proposé des représentations microscopiques correctes. Mais, ce pourcentage reste néanmoins inférieur au rendement moyen de ces élèves sur l'ensemble du test qui était un peu plus au-dessus de 50 %. Cela a permis à ces chercheurs de conclure que le niveau de compréhension des élèves était relativement bas sur le concept de concentration chimique, comparer à d'autres concepts.

Au niveau universitaire, De Berg (2012) a étudié la compréhension de 145 étudiants (apprenants de plus de 20 ans) australiens de première année universitaire en chimie sur la concentration d'une solution aqueuse sucrée présentée sous la forme microscopique où les particules de sucre en solution sont modélisées et sous la forme littérale faisant référence à des quantités macroscopiques de sucre en solution. Pour ce faire, il leur est demandé de choisir la représentation microscopique qui correspond le mieux à leur visualisation de particules de sucre dans une solution aqueuse sucrée ou encore de donner la concentration d'une solution aqueuse sucrée à l'aide d'une autre de concentration connue. Les résultats obtenus par De Berg montrent que plus de la moitié des étudiants choisit la représentation microscopique où les particules de sucre sont absentes (rectangle vide). De plus, les étudiants réussissent beaucoup mieux à résoudre les problèmes présentés sous la forme macroscopique (forme littérale) que ceux présentés en utilisant des représentations microscopiques de particules de sucre en solution. De Berg explique ces résultats par le fait que les apprenants ne comprennent pas la nature discontinue et particulière de la matière au niveau microscopique à cause de l'existence des conceptions alternatives sur le processus de dissolution et de la nature des solutions chez ces derniers. Il conclut sa recherche en présumant que la représentation submicroscopique des phénomènes chimiques au niveau atomique et moléculaire est plus susceptible d'améliorer la résolution de problèmes conceptuels plutôt qu'algorithmiques, et elle rend aussi l'apprentissage de la chimie particulièrement difficile pour les étudiants lorsqu'elle est mal exécutée.

Les recherches que nous venons de présenter montrent que les apprenants du secondaire et du supérieur ont un niveau de compréhension relativement faible sur la nature des solutions et sur le phénomène de dissolution à l'échelle microscopique et de ses représentations symboliques, lié à l'existence des conceptions alternatives chez ces derniers.

Parmi les conceptions alternatives identifiées dans ces études, nous avons celle selon laquelle « *si le volume d'une solution augmente en raison de la dilution, la quantité de soluté dissous par unité de volume diminue, car l'eau supplémentaire augmente la solubilité du sucre* » (Adadan & Savasci, 2012 ; Calik, 2005 ; Devetak et al., 2009). Ces chercheurs attribuent cette conception au fait que les élèves conçoivent les molécules de sucre dans la solution aqueuse sucrée comme des grains de sucre non dissout, et donc, l'ajout d'eau contribue à réduire davantage leur taille jusqu'à leur disparition complète dans la solution obtenue. Nous avons aussi la conception selon laquelle « *les molécules de soluté disparaissent ou ne sont pas réparties de manière homogène dans la solution finale obtenue* » De Berg (2012). Son explication est presque similaire à celle qui est donnée précédemment. Enfin, nous avons « *l'association incorrecte des valeurs numériques aux variables de la concentration chimique* » qui est une difficulté due au fait que la majorité des apprenants se concentre uniquement sur le nombre de particules de soluté et non sur le nombre de particules de soluté par unité de volume conformément à la définition de la concentration chimique (Devetak et al., 2009 ; De Berg, 2012).

Toutes ces conceptions alternatives sur les aspects qualitatifs des solutions (nature des solutions et processus de dissolution) rendent l'acquisition du concept de concentration chimique difficile pour les apprenants, ainsi que leur compréhension de certains phénomènes chimiques. Mais en dehors de ces conceptions alternatives, Andersson (1990) pense que les difficultés d'apprentissage de la concentration chimique et de certains concepts de la chimie des solutions peuvent aussi provenir des caractéristiques déroutantes des représentations microscopiques des solutions utilisées dans l'enseignement de la chimie.

Néanmoins, certaines études ont aussi porté sur les aspects quantitatifs des solutions qui impliquent directement les calculs des concentrations chimiques. Mais ces études ont plutôt exploré les difficultés d'apprentissage du concept de concentration chimique dans le cadre de recherches plus larges, portant par exemple sur la stoechiométrie, la quantité de matière et le raisonnement proportionnel (Raviolo et al., 2021). Toutefois, les recherches qui traitent spécifiquement les difficultés d'apprentissage de la concentration chimique au niveau macroscopique (concentration molaire ou massique d'une solution) et au niveau microscopique (concentration des espèces chimiques en solution) sont davantage plus rares.

Bélangier et Verreault (2001) ont évalué à l'aide d'un questionnaire la compréhension de 62 élèves de quatrième secondaire québécois (14-15 ans) sur les concepts de la mole et

de la concentration molaire lors de la modélisation de ces deux concepts à travers les manuels de chimie de ce niveau d'étude. Les résultats qu'ils ont obtenus montrent que les concepts comme la mole, le volume et la concentration chimique molaire sont abstraits et complexes au départ. Mais avec un travail intellectuel fourni par l'apprenant sous l'œil vigilant d'un enseignant, ils peuvent devenir plus concrets. De plus, la concentration molaire est présentée aux apprenants au niveau théorique comme le nombre de moles de soluté par litre de solution et au niveau procédural comme un processus où l'apprenant doit d'abord déterminer la quantité de matière contenue dans une solution avant de déterminer sa concentration, compliquant ainsi le calcul de ladite concentration. Malheureusement, cette recherche est restée essentiellement théorique, car les modèles conçus n'ont pas été testés dans les conditions réelles d'apprentissage, afin de juger de leur efficacité.

Gandillet et Le-Marechal (2003) ont identifié en France les conceptions de 47 élèves de la Première S (16-17 ans) relatives à la concentration des ions en solution aqueuse à l'aide de la question suivante : « *si l'on introduit 0,2 mol de chlorure de fer  $FeCl_3$  dans un litre d'eau, quelle est la concentration des ions  $Fe^{3+}$  et celle des ions  $Cl^-$  ? Réponse : 0,2 mol.L<sup>-1</sup> pour les ions fer et 0,6 mol.L<sup>-1</sup> pour les ions chlorure* » (Grandillet et Le Maréchal, 2003, p.162). Les résultats obtenus montrent que plus de 25 % des élèves interrogés répondent à la question posée en utilisant le principe de la conservation de la « quantité ». Ils divisent la quantité de matière de chlorure de fer (0,2 mol) par deux en justifiant *qu'il y a 0,2 mol dans la solution donc 0,1 mol de chlorure et 0,1 mol de fer* ; par le nombre d'entités (0,2x1/4 de mol de  $Fe^{3+}$  et 0,2x3/4 de mol de  $Cl^-$ ) et enfin, par deux et par le nombre d'entités à même temps ( $n(Fe^{3+}) = 0,2/2$  et  $n(Cl^-) = (0,2/2)/3$ ) (p. 162). Cela montre que ces élèves ne tiennent pas compte du caractère intensif de la grandeur concentration chimique dans leur calcul, car en aucun cas, le volume de la solution n'est pris en compte. Ils sont aussi incapables de faire fonctionner la formule de la concentration molaire d'une solution ( $C=n/V$ ) lorsqu'il s'agit de déterminer les concentrations des espèces ioniques en solution. À ces sujets, Gandillet et Le-Marechal ont identifié les conceptions alternatives qui sont à l'origine de ces difficultés chez ces élèves. Il s'agit de la conception de « *l'entité-quantité* » et de la conception selon laquelle « *la quantité de matière et la concentration chimique de la solution se partagent lors de la dissolution* » (p. 162). Pour ces chercheurs, les origines possibles de ces conceptions sont diverses. Les apprenants pensent, d'une part, que la quantité de chaque espèce ionique en solution dépend de sa grosseur ou de sa taille matérialisée dans la représentation symbolique du réseau cristallin utilisée en chimie. D'autre part, ils pensent

que lors de la dissolution des solides ioniques dans l'eau, chaque ion emporte une partie de la concentration totale de la solution. Ces résultats montrent qu'une mauvaise conceptualisation de la quantité de matière, du caractère intensif de la grandeur concentration chimique et de la dissolution ainsi que son processus conduit à la non-compréhension de la concentration d'une espèce chimique en solution par les apprenants. Ces résultats semblent être confirmés au niveau universitaire par Chong et al. (2019) lorsque dans le cadre de leur étude portant sur les difficultés des étudiants à résoudre les problèmes conceptuels liés à la mole et à la concentration d'une solution, ils ont demandé à 38 étudiants malaisiens de première année de science (âgés de 18 à 19 ans) de calculer les concentrations des ions contenus dans 0,20 mol/L de solution de sulfate d'aluminium ( $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ ). À cette question qui testait plus précisément la compréhension de ces étudiants sur la différence entre la concentration d'une molécule et celle d'un ion en solution, seulement 4/38 étudiants ont donné une bonne réponse contre 34/38 étudiants qui ont répondu de façon erronée ou n'ont pas du tout répondu. Mais lorsque ces chercheurs ont mené une enquête plus approfondie auprès de ces étudiants, ils ont constaté que le mot « ions » a semé la confusion chez les étudiants, car plusieurs ont déclaré qu'ils ne savaient pas à quel(s) ion(s) la question faisait référence. Ces résultats montrent, une fois de plus, les difficultés qu'ont les apprenants à mobiliser le concept de concentration chimique au niveau microscopique quel que soit leur niveau d'études. Ces difficultés sont liées à une mauvaise compréhension de ce concept et de sa trame conceptuelle.

Willame et Snauwaert (2015) et Willame (2017) lors de l'élaboration des outils didactiques visant à améliorer l'apprentissage du concept de la concentration molaire et celui de la concentration massique auprès des apprenants belges de grade 10 à 12 (15-18 ans) ont identifié au préalable à l'aide d'un questionnaire à choix multiples, les erreurs fréquemment commises par ces derniers lorsqu'ils mobilisent ces concepts. Les résultats obtenus par ces chercheurs montrent qu'il s'agit de : la confusion entre le volume de la solution et le volume du solvant ; la non-compréhension de la concentration chimique comme une proportion ou un rapport ; la mauvaise utilisation du langage chimique lié au soluté, au solvant et à la solution et les erreurs de calcul ou des manipulations erronées des unités lors de la détermination de la concentration chimique. Lorsque Willame et Snauwaert se sont intéressés aux origines de ces erreurs à l'aide d'un entretien, ils ont aussi constaté que ces élèves avaient des conceptions alternatives extrêmement variées sur la nature de la solution et sur la concentration chimique. Plusieurs de ces apprenants pensent que :

- la concentration mesurerait l'écart entre les entités de soluté ;
- un soluté dispersé serait « libre de voyager » ;
- la concentration serait une ou des billes au sein de la solution ;
- la concentration mesurerait le rassemblement des entités de soluté au sein de la solution ;
- un petit volume de solution entraînerait une grande (ou une petite) concentration ;
- la concentration d'une fraction de solution serait directement proportionnelle au volume prélevé de cette solution, pour ne citer que celles-là.

Cela témoigne du fait que la plupart de ces élèves semblaient puiser plus dans leurs cadres théoriques naïfs et/ou dans leur répertoire d'habitudes interprétatives pour trouver les réponses aux questions qui leur sont posées. Malheureusement ces difficultés liées à la compréhension de la concentration molaire et de la concentration massique semblent elles aussi perdurer jusqu'au niveau universitaire d'après l'étude de Raviolo et al. (2021) portant sur la compréhension de ces concepts par les étudiants universitaires. À ce sujet, ces chercheurs ont exploré la compréhension de 303 étudiants universitaires argentins de première année de chimie (âgés entre 18 et 20 ans) sur les relations logiques-mathématiques entre les variables  $n$  (quantité de matière),  $V$  (volume de solution) et  $M$  (masse molaire) à l'aide d'un questionnaire centré sur les problèmes conceptuels suivi, des entretiens réflexifs liés à ce questionnaire avec 18 de ces étudiants. Les résultats qu'ils ont obtenus révèlent que plus de la moitié de ces étudiants n'ont pas une compréhension conceptuelle claire et profonde de la molarité, car ils présentent des difficultés pour identifier et différencier les variables qui entrent dans la définition de la molarité ( $n$ ,  $V$  et  $M$ ). Ils ont aussi des difficultés pour reconnaître la nature de ces variables ( $n$  et  $V$  sont des variables extensives et  $M$  et  $C$  sont des variables intensives) lorsqu'ils établissent les relations de proportionnalité directe ou inverse entre elles. Ces chercheurs concluent leur recherche en recommandant que pour une maîtrise profonde du concept de concentration molaire, il faut entraîner de préférence les apprenants à résoudre les problèmes conceptuels sur ce concept au lieu de s'appuyer sur l'utilisation mécanique de procédures algorithmiques et numériques qui leur empêchent de voir au-delà des chiffres et de saisir les relations entre les variables impliquées dans sa définition. D'où la nécessité d'élaborer et de tester des nouvelles stratégies d'apprentissage pour surmonter les difficultés qui entravent la construction du concept de concentration chimique chez les apprenants.

### **3.3. Bilan des études visant à remédier aux difficultés connues dans l'apprentissage de la concentration chimique**

Pour compléter son étude, Willame (2016, 2017) a élaboré des activités de remédiation basées principalement sur le conflit cognitif pour remédier aux erreurs suivantes : « La concentration n'est pas comprise comme une proportion » et « le volume considéré n'est pas celui de la solution ». Pour ce faire, elle a demandé à chaque élève de prévoir l'évolution de la concentration en soluté d'une solution lorsqu'on modifie un de ces paramètres et de prédire aussi le comportement du niveau de liquide lorsqu'on dissout le sel dans l'eau ; de réaliser par la suite une expérimentation et de confronter enfin sa prévision aux résultats de son expérimentation. Si au terme de ce processus, une différence existe entre sa prévision et l'observation réel des résultats de son expérimentation, alors l'élève devrait être en conflit percepto-cognitif. Les résultats obtenus montrent que malgré le conflit cognitif positif observé chez la majorité des apprenants, beaucoup ne parvenaient pas toujours à répondre correctement aux questions posées. Ce qui traduit une difficile possibilité de changement de prévalence conceptuelle par les conflits cognitifs.

Ces résultats qui sont corroborés par les recherches en neuroscience éducative (Dunbar et al., 2007 ; Houdé, 2000 ; Houdé, 2007 ; Houdé, 2014a ; Malenfant-Robichaud, 2018 ; Masson, 2012) suggèrent que le cerveau réagirait parfois mal au conflit cognitif et les conceptions alternatives ne seraient vraisemblablement jamais effacées, mais plutôt inhibées au profit des conceptions expertes lorsque l'apprenant parvient à surmonter une difficulté conceptuellement problématique. Ce postulat a abouti à l'élaboration de plusieurs modèles de changement conceptuel dont l'un des plus récents est celui de la prévalence conceptuelle (Dawson, 2014 ; Potvin, 2013 ; Potvin, 2018 ; Potvin et al., 2015). Ce modèle postule que plusieurs conceptions contradictoires peuvent possiblement coexister et qu'en rendant la conception scientifique disponible, suivie d'une inhibition des conceptions non-pertinentes dans le contexte de la question, cela permettrait de répondre plus souvent à la question de manière correcte.

En intégrant cette nouvelle dimension du changement conceptuel dans sa recherche, Van Lerberghe (2017) a évalué l'action conjointe du contrôle inhibiteur et du conflit cognitif sur la confusion entre le volume de solution et celui du solvant lors de l'acquisition du concept de concentration massique auprès de 66 élèves belges de troisième année général option science (14-15 ans). Pour ce faire, Van Lerberghe a reparti ces élèves en deux



groupes. Le groupe expérimental composé de 33 élèves qui a reçu un enseignement utilisant le contrôle inhibiteur et le conflit cognitif, et le groupe-témoin composé également de 33 élèves qui a reçu, à son tour, un enseignement traditionnel n'utilisant ni le contrôle inhibiteur ni le conflit cognitif. Les résultats obtenus montrent qu'un enseignement alliant contrôle inhibiteur et conflit cognitif ne permet pas d'obtenir des scores plus élevés au post-test comparativement à un enseignement classique ou traditionnel pour les apprenants ayant une bonne capacité d'inhibition. Même si cette piste reste encore à approfondir, ces résultats viennent à nouveau confirmer la difficulté pour qu'un changement de prévalence conceptuelle s'opère si l'apprentissage n'est pas minutieusement planifié.

Dans une nouvelle tentative de remédiation à la même erreur (confusion entre volume du solvant et volume de la solution), Willame (2017) et Willame et Snauwaert (2018) ont élaboré un dispositif didactique expérimental basé sur l'utilisation d'outils qui créaient le conflit cognitif suivi d'un entraînement à l'inhibition des conceptions non-pertinentes dans le but d'améliorer l'apprentissage du concept de concentration chimique. Il est demandé à nouveau à 78 élèves du secondaire supérieur belges grade 10 (15-17 ans) de mettre en place, après qu'un conflit cognitif soit créé, une alerte cognitive permettant à ces derniers d'inhiber les conceptions alternatives afin d'activer correctement la conception experte, suivie d'une automatisation des alertes. Lorsque ces chercheurs ont comparé les scores de ces élèves aux scores obtenus par 72 autres élèves qui ont suivi un apprentissage basé uniquement sur le conflit cognitif, ils ont constaté qu'ils étaient nettement plus élevés. Ces résultats montrent un impact positif du conflit cognitif suivi d'un apprentissage métacognitif à l'inhibition lors de l'acquisition du concept de concentration chimique par ces élèves, comparativement à un apprentissage classique basé uniquement sur le conflit cognitif. Malheureusement, avant la mise en œuvre des différentes stratégies de remédiation proposées par Van Lerberghe (2017), Willame (2017) et Willame et Snauwaert (2018), les apprenants qui commettent des erreurs lorsqu'ils déterminent la concentration d'une solution n'ont pas été identifiés au préalable. Ce qui biaise l'évaluation de l'impact réel de la stratégie de remédiation basée sur le contrôle inhibiteur utilisée par ces derniers, car la remédiation est l'intervention d'un expert auprès d'un ou des apprenant(s) qui éprouvent des difficultés dans leur apprentissage.

En tenant compte des différentes limites relevées dans les études précédentes, Ayina Bouni et al. (2021) dans une étude préliminaire qui a balisé la présente thèse, ont évalué, à leur tour, l'impact de la remédiation par changement de prévalence conceptuelle sur les scores des élèves camerounais de la classe de troisième (élèves de 14 à 16 ans) de

l'enseignement secondaire général éprouvant des difficultés à différencier le volume de la solution de celui du solvant lors de la détermination de la concentration molaire d'une solution. Ils ont confronté, à cet effet, les scores obtenus par deux groupes équivalents (35 élèves chacun) identifiés après le prétest comme ayant des difficultés à conceptualiser la concentration molaire. L'un est soumis à un apprentissage visant le changement de prévalence conceptuelle et l'autre soumis à un apprentissage impliquant le conflit cognitif uniquement. Les résultats obtenus par ces derniers montrent que comparativement à un apprentissage impliquant le conflit cognitif, l'apprentissage visant la prévalence conceptuelle améliore de manière significative les scores des apprenants. Cela leur a permis de présumer que l'apprentissage basé sur la prévalence conceptuelle permet une meilleure conceptualisation de la concentration molaire d'une solution par les élèves camerounais de niveau troisième.

#### **4. Question et hypothèse générales de la recherche**

De ce qui précède, il ressort qu'à travers le monde les apprenants ont des difficultés lors de la conceptualisation et de la mobilisation du concept de concentration chimique. Ces difficultés sont d'autant plus importantes lorsque les apprenants doivent conceptualiser ou mobiliser la concentration d'une espèce chimique en solution (dimension microscopique) pour résoudre les problèmes conceptuels et calculatoires en chimie. Ces difficultés sont liées d'une part, à la nature abstraite de ce concept et à l'existence chez les apprenants de conceptions alternatives sur certaines notions telles que : la dissolution et son processus, la nature et la composition d'une solution, l'équation chimique, la nature particulière de la matière, la stœchiométrie d'une réaction, la quantité de la matière, la proportionnalité et le caractère intensif ou extensif d'une grandeur physique pour ne citer que celles-ci, qui sont nécessaires pour sa compréhension. D'autre part, elles sont liées à l'emploi des modèles chimiques, parfois non-adéquat ou non compris par les apprenants lors de la transposition de la contraction chimique et de ces notions pivots. Malheureusement, qu'aucune étude supra-mentionnée n'a catégorisé ces difficultés en fonction des types de raisonnement qui conduisent aux réponses fausses que les apprenants proposent comme suggèrent Taber (2001) et Cormier (2014) pour que leur remédiation soit efficace. Car en dehors des difficultés liées aux conceptions alternatives, les difficultés d'apprentissages peuvent être également liées aux carences conceptuelles, aux mauvais agencements conceptuels ou aux fragmentations conceptuelles, au niveau du développement cognitif de l'apprenant, etc. Par conséquent, il faut remédier à chacune de ces catégories de difficultés de façon différente.

Parce que la remédiation des difficultés liées aux carences, aux fragmentations et aux mauvaises coordinations conceptuelles ne nécessite pas toujours le développement des dispositifs didactiques qui doivent favoriser le changement conceptuel comme c'est le cas pour la remédiation des difficultés liées aux conceptions alternatives (Cormier, 2014).

De plus, la plupart des études didactiques portant sur la remédiation des difficultés liées à la compréhension de la concentration chimique par les apprenants se sont limitées à la concentration molaire et à la concentration massique (dimension macroscopique). Dans ces études, l'apprentissage débute toujours par un conflit cognitif sans décrire au préalable aux apprenants les modèles (conceptions) scientifiques dont on veut leur faire apprendre comme le suggère le modèle de prévalence conceptuelle (Potvin, 2018). En plus de cela, dans les études de Van Lerberghe (2017), Willame (2017) et Willame et Snauwaert (2018) l'accent est possiblement trop mis sur l'entraînement des apprenants à une des fonctions exécutives qui est le contrôle inhibiteur. Or, l'étude de Blakey et al., (2020) visant à comprendre pourquoi les enfants (4 ans) diffèrent tellement dans leurs compétences en mathématiques a montré qu'une formation des apprenants ciblant uniquement les fonctions exécutives n'est pas un moyen efficace pour aider les apprenants à surmonter leur difficulté d'apprentissage.

Nous constatons également qu'à travers le monde (et au Cameroun en particulier), il n'existe aucune étude visant à élaborer des stratégies pour remédier aux difficultés rencontrées par les apprenants lors de la conceptualisation de la concentration d'une espèce chimique en solution à notre connaissance. Or, cette dimension de la concentration chimique est très importante dans l'apprentissage et dans la compréhension de ce concept et, plus largement, des phénomènes chimiques.

De même, pour s'assurer que nous pouvons aussi transférer et appliquer réellement les conclusions des écrits scientifiques sur ce sujet dans le contexte de l'enseignement secondaire camerounais, il est important qu'une recherche y soit menée. Ainsi, la présente recherche, qui est vraisemblablement la première portant sur le concept de concentration chimique dans le contexte camerounais, vise à évaluer l'impact d'un apprentissage basé sur le modèle de prévalence conceptuelle sur les difficultés rencontrées par les apprenants camerounais des séries scientifiques de l'enseignement secondaire général lorsqu'ils déterminent la concentration d'une espèce chimique en solution aqueuse. Ce modèle qui est le plus à jour en matière de changement conceptuel suggère aux enseignants d'arrêter de

combattre les croyances-premières des apprenants. Car les résultats des recherches en neurodidactique des sciences que nous allons décrire au prochain chapitre montrent que ces croyances persistent et coexistent avec les nouvelles connaissances apprises dans le cerveau tout le long de la vie. Pour ce faire, le modèle de prévalence conceptuelle propose aux enseignants de donner, dès le départ, les bases des connaissances scientifiques que l'on souhaite voir émerger chez les apprenants pour qu'elles entrent très rapidement dans la course avec leurs idées préconçues. Par la suite, il s'agit d'entraîner les apprenants à reconnaître les circonstances dans lesquelles ils devraient résister à utiliser leurs idées préconçues et mécanismes routiniers des résolutions des problèmes développés durant l'apprentissage au profit plutôt de l'emploi des connaissances scientifiques apprises et adaptées à la circonstance.

Pour atteindre l'objectif visé par cette recherche, la question principale que nous chercherons à répondre dans cette thèse est :

**Quel est l'impact d'un apprentissage basé sur le modèle de prévalence conceptuelle sur les difficultés rencontrées par les élèves camerounais des séries scientifiques de l'enseignement secondaire général lors de la détermination de la concentration d'une espèce chimique en solution ?**

Pour répondre à cette question, l'hypothèse générale que nous allons vérifier sur le terrain est la suivante :

**Un apprentissage basé sur le modèle de prévalence conceptuelle permet de surmonter les difficultés rencontrées lors de la détermination de la concentration d'une espèce chimique en solution par les apprenants camerounais des séries scientifiques de l'enseignement secondaire général.**

En définitive, la réalisation de cette recherche contribuera à mettre en lumière les erreurs commises par les apprenants et leurs origines lorsqu'ils acquièrent le concept de concentration d'une espèce chimique en solution et dont il faut en tenir compte pour améliorer son enseignement et son apprentissage. De plus, dans le contexte camerounais, la présente recherche mettra aussi en lumière une nouvelle méthode d'apprentissage qui est le modèle de prévalence conceptuelle issu des recherches en neurodidactique des sciences qui est un champ de recherche en plein essor. Car en présentant au préalable la conception pertinente du concept qu'on veut faire étudier aux apprenants, suivi du descellement des pièges lors de la mise en œuvre d'une leçon, nous attirerons l'attention des élèves sur ce

qu'ils ne doivent pas faire afin de faire prévaloir leurs conceptions pertinentes sur celles non-pertinentes et d'éviter d'automatiser leurs conceptions alternatives. Cela traduira ainsi l'opérationnalisation des conceptions prévalentes en situation de classe. Cependant, pour bien conduire notre recherche, il est nécessaire de définir et de clarifier les concepts pivots qui y sont impliqués. Cette tâche fait l'objet du prochain chapitre.

## **CHAPITRE 2 : CADRE CONCEPTUEL**

Dans ce chapitre, nous allons clarifier les différents concepts clés de la présente recherche afin de mieux comprendre et délimiter le phénomène étudié. Ces clarifications conceptuelles vont conduire aux formulations opérationnelles des questions et hypothèses spécifiques de la recherche. Mais avant de le faire, nous allons au préalable définir la notion de concept.

### **1. Qu'est-ce qu'un concept ?**

Dans le sens commun du langage, un concept est une idée générale ; une représentation abstraite que se fait l'esprit humain d'un objet ou d'un ensemble d'objets ayant des caractères communs (Rey, 2010 ; Robert, 2010). En psychologie, un concept est un mot ou une expression sous laquelle peut être représentée une classe d'objets, d'événements, de relations, etc., qui possèdent des éléments ou des propriétés en commun (Bloch et al., 1999). En d'autres termes, un concept est une représentation individuelle ou une unité cognitive présente, en principe, dans la mémoire cognitive à long terme d'un sujet particulier. Au travers de ces définitions, nous constatons que le sens du mot « concept » demeure toujours large. Elles ne nous fournissent pas assez d'éléments pour l'appréhender dans le contexte de la présente recherche.

En pédagogie et en didactique, un concept est une représentation (par exemple d'un objet, mais ça peut être également un sentiment, une action, etc.) dont on peut se faire une idée sans l'avoir en face de soi (Barth, 2013). C'est un ensemble de construits rendant compte de caractéristiques communes à un ensemble d'objets, de faits ou de phénomènes (Reuter et al., 2007). Un concept est donc caractérisé par ses attributs qui peuvent être physiquement observables ou non observables. La difficulté du concept réside dans l'ensemble des attributs que l'on va retenir pour le définir. Parfois, ces attributs seront qualifiés d'essentiels, alors qu'ils sont en réalité secondaires. D'autres fois, ces attributs peuvent être incorrects et ils glissent dans la définition, une fausse interprétation du concept (Barth, 2013). Toutefois, les attributs d'un concept permettent de le distinguer des autres concepts ou de l'identifier. Apprendre un concept revient donc à reconnaître et distinguer ses attributs essentiels, les mettre en relation, et nommer la combinaison d'attributs par une étiquette, un symbole arbitraire qui est la dénomination du concept lui-même. Ces trois opérations représentent la structure d'un concept (Barth, 2013).

Ainsi, Bruner<sup>11</sup> pense que si nous désirons faciliter l'accès au savoir chez nos élèves, nous devons considérer le concept comme la base de la réflexion et de la pensée (Bruner, 1983). À ce titre, les concepts permettent non seulement de se représenter le monde, mais de l'appréhender, c'est-à-dire de le comprendre (Barth, 2013). Mais, pour mieux appréhender le sens de la notion de concept et de son apprentissage dans le contexte scolaire, Barth (2018) suggère de faire une distinction entre les activités d'apprentissages des plus jeunes qui consistent à chercher un mode de regroupement selon des critères subjectifs (la formation des concepts) et les activités d'apprentissages scolaires qui consistent à s'approprier un ensemble des règles de classification bien déterminé par d'autres (l'apprentissage des concepts). Il est alors important de faire une différence entre les concepts scientifiques élaborés dans les disciplines de recherche ; les concepts scolaires qui sont construits et travaillés dans l'espèce scolaire ; et les concepts quotidiens de la vie de tous les jours (Reuter et al., 2007 ; Vergnaud, 1990).

Les concepts scientifiques sont des unités du discours théorique caractérisées par leur mode de construction et leur définition qui fonctionnent dans un réseau et ils sont également des outils du travail théorique (Reuter et al., 2007). Ce sont également des tentatives de représenter une partie du réel dans un cadre théorique donné, à l'aide de paramètres fixés par la discipline concernée, qui évoluerait donc avec cette discipline (Brossard, 2008). Les concepts scientifiques sont des tentatives de représentation de la réalité des choses, mais sans pour autant être la réalité (Barth, 2013, 2018).

Les concepts scolaires sont : l'ensemble des situations qui lui donnent du sens ; l'ensemble des formes langagières et non-langagières qui permettent de présenter symboliquement un concept, ses propriétés, les situations et les procédures de traitement ; enfin, c'est l'ensemble des invariants opératoires (Reuter et al., 2007). C'est-à-dire l'ensemble des outils de représentation du réel qui permettent d'organiser la recherche des informations pertinentes en fonction du problème à résoudre ou du but à atteindre.

---

<sup>11</sup> Jerome S. Bruner (1915-2016) était un psychologue américain et pionnier de la psychologie cognitive culturelle. Il a développé durant plus de sept décennies, un thème central intitulé : la quête de sens. Ces travaux s'inscrivent dans la continuité des travaux de : John Dewey, Lev Vygotski et Jean Piaget. Il considère l'enfant comme un « chercheur de structures » qui s'efforce de comprendre comment les choses du monde extérieur sont reliées entre elles. Pour Bruner, dès la naissance, l'enfant possède déjà tout le potentiel nécessaire pour apprendre du fait de l'évolution des organismes vivants. Mais il a besoin de l'interaction avec les membres de sa culture (Vygotski, 2019) qui l'aideront à se servir des « outils » qui s'y trouvent pour apprendre à parler, à communiquer avec son entourage. Le langage qu'il a appris lui servira à préciser et à structurer sa pensée, car l'individu qui apprend participe activement à la construction de son savoir (Barth, 2018).



En didactique, plus concrètement, les concepts scolaires découlent de la transposition didactique des concepts scientifiques (Reuter et al., 2007). Les deux catégories de concepts sont liées et elles vont de pair. Un concept, qu'il soit scientifique ou scolaire, ne fonctionne pas seul. Il fait toujours partie d'un système conceptuel que Vergnaud (1990) appelle « champ conceptuel »<sup>12</sup>. Nous avons par exemple, le concept de concentration chimique, plus particulièrement le concept de concentration d'une espèce chimique en solution, qui est au centre de la présente étude, dont sa compréhension et sa mobilisation en chimie fait appel à plusieurs autres concepts de la chimie des solutions comme nous allons le montrer par la suite.

Les concepts quotidiens sont des représentations spontanés qui se construisent bien évidemment au cours des expériences quotidiennes que l'enfant peut faire sur le monde physique et social auquel il est confronté (Brossard, 2008). Ces représentations, construites au cours des échanges avec autrui sur la base d'une expérience commune, sont, selon Brossard, encore loin d'avoir les caractéristiques des concepts proprement dits. Elles sont dites spontanées, car les activités de structuration et de fonctionnement des expériences qui conduisent aux constructions desdites représentations sont avant tout « agies », « pratiquées » et « non-conscientes » (Brossard, 2008). Comme le mentionne Vygotski (2019) par exemple, un enfant peut parler de « l'arbre » ou de « son frère » sans pour autant être capable de définir clairement ce qu'est un arbre ou ce qu'est un frère.

Les concepts scientifiques appris dans le cadre scolaire sont d'abord définis de façon explicite avant de pouvoir être mobilisés (Reuter et al., 2007). Ils se construisent dans des situations élaborées et travaillées dans l'espace scolaire avec l'accompagnement d'un enseignant. Alors que les concepts quotidiens, quant à eux, s'élaborent sur la base des pensées non-conscientes et ils ne reposent pas sur une définition explicite ou formulée (Brossard, 2008 ; Vygotski, 2019).

En outre, les concepts quotidiens, contrairement aux autres types de concepts, ne sont ni organisés, ni liés ou mis entre eux dans un système (Reuter et al., 2007). Et quand bien

---

<sup>12</sup> Un champ conceptuel est l'ensemble des situations dont la mise en acte implique des combinaisons de schèmes et de concepts. Il est développé par le psychologue et mathématicien français Gérard Vergnaud en 1990. Plus explicitement, il étudie comment les élèves agissent au niveau mental lorsqu'ils sont placés dans des nouvelles situations d'apprentissage. Comment ils prennent conscience de leurs actions sur les objets et reconstruisent leurs représentations de leurs actions, c'est-à-dire comment ils conceptualisent le réel, en mobilisant des connaissances déjà présentes et des activités cognitives pour apprendre. C'est également un ensemble des concepts qui contribuent à la maîtrise des situations (Vergnaud, 1990).

même ils sont mis en relations, ces relations demeurent partielles et instables (Brossard, 2008). Les concepts quotidiens sont utilisés et leur définition est construite dans un second temps, alors que les concepts scientifiques construits à l'école nécessitent un premier travail sur les définitions avant qu'ils ne soient mis en lien avec des situations (Reuter et al., 2007). Selon Vygotski, les concepts scientifiques appris dans le cadre scolaire et les concepts quotidiens entretiennent des rapports différents avec les objets. Ce qui fait la force de l'un est la faiblesse de l'autre. Par exemple, la force d'un concept quotidien est liée au fait qu'il se construit à partir d'expériences concrètes (il est fortement enraciné dans la pensée). Tandis que sa faiblesse est liée à son faible degré de généralité. De façon réciproque, la force d'un concept scientifique est plutôt liée à son haut degré de généralité et leur mise en œuvre consciente et volontaire. Tandis que sa faiblesse est liée au fait qu'au cours de son acquisition, l'enfant ou l'élève ne peut pas encore conceptualiser les expériences concrètes (Brossard, 2008 ; Vygotski, 2019).

Au travers de ces rapports réciproques supra-mentionnés qu'entretiennent les concepts scientifiques construits dans le cadre scolaire et les conceptions quotidiens construits à partir d'expériences concrètes, Vygotski a introduit le concept de double germination des concepts chez l'élève. Pour ce chercheur, les concepts quotidiens se développent ou germent du bas vers le haut (c'est-à-dire à partir de l'interaction avec les objets du monde des actions concrètes vers le monde reconstruit ou des modèles) en frayant la voie à l'assimilation des concepts scientifiques qui, à son tour, se développent du haut vers le bas en frayant la voie au développement des concepts quotidiens (Vygotski, 2019).

En définitive, pour faire preuve d'appropriation d'un concept scientifique dans le cadre d'une discipline scolaire, il faut en être capable de : donner une définition et posséder une ou plusieurs images mentales nécessaires à son utilisation dans une situation donnée ; comprendre l'idée générale du concept dans sa globalité et connaître ses domaines d'applications ; estimer les limites du concept ainsi que son domaine de validité ; pouvoir manipuler les formules et algorithmes liés au concept ; savoir interpréter les phénomènes physiques différents de ceux étudiés en classe en utilisant et de le prévoir en utilisant ce concept ; etc. (Barth, 2013 ; Brossard, 2008 ; Vergnaud, 1990). Cependant, le concept n'est pas unique et commun entre les personnes. Chacun construit son concept à partir de l'ensemble de situations confronté au cours de sa vie. Cela fait que chaque personne a une ou des conceptions différentes sur un concept scientifique qu'elle acquiert. Ces différentes conceptions sont dues aux processus cognitifs mis en jeu par chaque personne lors de

l'apprentissage d'un concept et aux connaissances préalables (concepts quotidiens) du sujet sur le concept (Brossard, 2008 ; Vergnaud, 1990). Pour un apprentissage réussi, la conception qu'on a du concept construit doit être scientifiquement acceptable comme nous allons le montrer dans la suite de ce chapitre.

## 2. Définition du concept de concentration chimique

Selon le dictionnaire Larousse (2017), le mot concentration veut dire rassemblement ou réunion en un point ou en un centre. Elle désigne aussi ce qui réunit des éléments assemblés. Ces définitions sont pertinentes dans plusieurs autres domaines qu'en chimie. Nous avons par exemples : la concentration urbaine des populations en géographie ; la concentration des industries ou des capitaux en économie ; les camps de concentration ou d'extermination sous l'Allemagne nazie en histoire ; la concentration du lait dans le langage courant ; la concentration de son énergie, de son esprit ou de son attention sur la résolution d'un problème en psychologie, etc.

Dans le domaine de la chimie, le mot concentration peut prendre, selon Willame (2017), deux significations bien distinctes : un procédé chimique ou une grandeur pourvue d'une unité. En tant que procédé : « *la concentration est un processus chimique qui consiste, soit à éliminer du solvant et ainsi augmenter la quantité de soluté par rapport au volume de solution, soit à ajouter directement le soluté dans un volume donné de solution* » (p. 32). Tout comme Willame, nous constatons que le sens donné à la concentration dans le langage commun reste encore pertinent. Mais en tant que grandeur chimique pourvue d'unités, elle est utilisée par les chimistes pour quantifier la composition d'une solution. Dans ce cas, le sens que lui accorde le langage commun n'est plus pertinent. À ce sujet, plusieurs chimistes ont proposé différentes définitions à savoir :

- « *La concentration d'une solution est une grandeur indiquant la quantité de soluté présente dans une quantité de solution donnée* » (Chang & Goldsby, 2014, p. 30) ;
- « *La concentration d'une solution est le rapport entre une quantité de matière et un volume. Elle s'exprime en mol.m<sup>-3</sup> dans le système international d'unité (SI)* » (Brochard-Wyart et al., 2016, p. 9). Mais pour plus de commodité dans les laboratoires de chimie, les concentrations sont généralement exprimées en moles par litre (mol.L<sup>-1</sup> = 10<sup>3</sup> mol.m<sup>-3</sup>).

D'après ces deux définitions du concept de concentration en chimie, nous constatons que certaines notions comme la solution, le solvant et le soluté méritent d'être définies pour bien cerner ce concept.

### 2.1. Définitions des concepts solution, soluté et solvant

D'après Hill et al. (2008) ; Chang et Goldsby (2014) ; Boeyens-Volant et Warzée (2015) ; Brochard-Wyart, et al. (2016) :

- un solvant est la composante d'une solution dans laquelle le ou les solutés sont dissous et dont la quantité est généralement supérieure à celle du soluté ou des solutés ;
- un soluté est une composante d'une solution (substance chimique) dissoute dans le solvant, dont la quantité est généralement inférieure à celle du solvant ;
- une solution est un mélange homogène constitué de(s) soluté(s) et de solvant.

Dans la pratique, une solution peut être gazeuse, solide ou liquide comme l'indique le tableau 1.

**Tableau 1**

*Quelques exemples de solutions (Chang & Goldsby, 2014, p. 41)*

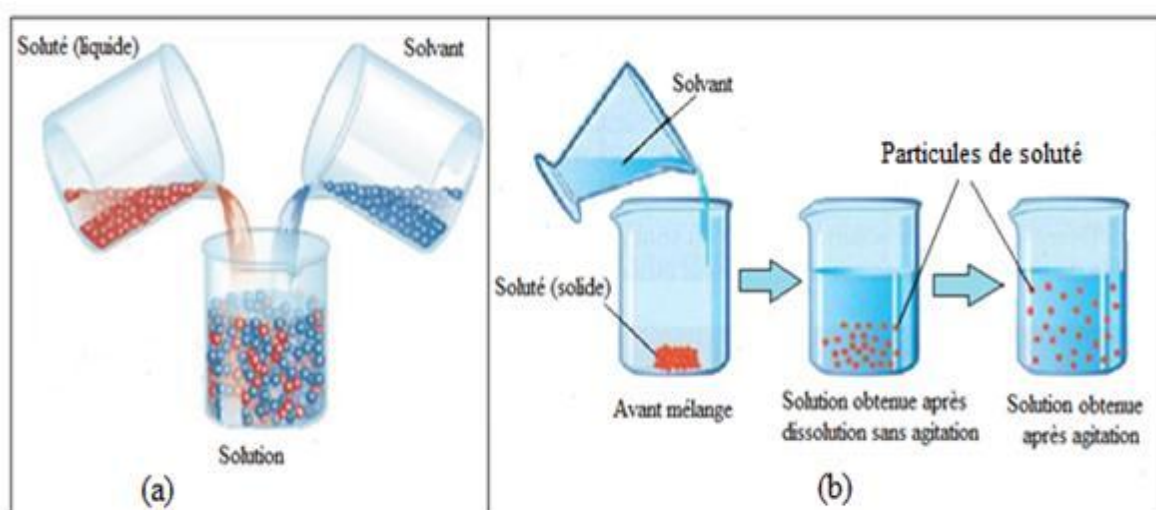
<b>Soluté</b>	<b>Solvant</b>	<b>Solution</b>	<b>Exemples (soluté(s) dans le solvant)</b>
<b>Gaz</b>	Gaz	Gaz	Air (O <sub>2</sub> , Ar, CO <sub>2</sub> ... dans N <sub>2</sub> )
<b>Gaz</b>	Liquide	Liquide	Boisson gazeuse (soda) (CO <sub>2</sub> dans H <sub>2</sub> O)
<b>Liquide</b>	Liquide	Liquide	Vinaigre (CH <sub>3</sub> COOH dans H <sub>2</sub> O)
<b>Solide</b>	Liquide	Liquide	Solution saline (NaCl dans H <sub>2</sub> O)
<b>Gaz</b>	Solide	Solide	Hydrogène (H <sub>2</sub> ) dans du palladium (Pd)
<b>Solide</b>	Solide	Solide	Or 14 carats (Ag dans Au)

Dans le cadre de notre étude, seules les solutions aqueuses (c'est-à-dire les solutions dans lesquelles le solvant est l'eau) seront abordées conformément aux programmes officiels de chimie du secondaire camerounais. En outre, les solutions que nous utiliserons seront considérées comme solutions idéales, c'est-à-dire la chaleur de dissolution est nulle et le volume de la solution est égal à la somme des volumes du solvant et du soluté. Cette

précision se justifie par le fait qu'il existe d'autres solutions qui sont non idéales. Par exemple la solution éthanol + eau. L'expérience montre qu'en mélangeant 50,0 mL d'éthanol avec 50,0 mL d'eau, le volume total (95 mL environ) est inférieur à la valeur attendue (100,0 mL) (Chang & Goldsby, 2014). Enfin, les solutions que nous allons utiliser sont celles dans lesquelles le soluté sera toujours au départ, un solide ou un liquide comme le montre le schéma de la figure 14.

**Figure 14**

Schémas montrant la modélisation d'une solution homogène avec pour soluté un liquide et un solide (Chang & Goldsby, 2014 ; Willame, 2017)



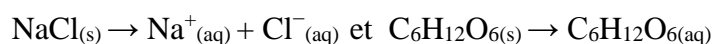
Le processus qui permet d'obtenir une solution lorsque le soluté est solide est appelé la dissolution. La sous-section ci-dessous traite ce concept qui est fondamental dans la compréhension de la concentration chimique et plus particulièrement, celle d'une espèce chimie en solution.

## 2.2. Définition de la dissolution

D'après les dictionnaires Rey (2010) et Larousse (2017), le mot dissolution vient du latin classique *dissolutio* qui signifie « séparation des parties ou dislocation ». En français et plus particulièrement en grammaire, la dissolution est la dénomination d'une absence de coordination. Elle vient du verbe d'action « dissoudre » qui renvoie à la « désagrégation ou anéantissement » de quelque chose. En tant qu'action, la dissolution consiste à dissoudre, à séparer, à faire cesser ou disparaître quelque chose qui existe. Par exemple en justice, prononcer par décision légale la dissolution d'un mariage, d'une communauté ou d'une société. C'est aussi le fait de se désagréger ou de perdre sa cohésion comme dans le cas de

la dissolution familiale. D'après ces différentes définitions, nous constatons que seul le sens étymologique de la dissolution (séparation des parties ou dislocation) reste pertinent en sciences physiques comparativement au sens qui lui est donné dans le langage commun (faire cesser ou disparaître quelque chose qui existe).

Dans le domaine de la chimie, plus précisément, la dissolution est le mélange de deux phases avec la formation d'une nouvelle phase homogène (IUPAC, 2019). En d'autres termes, c'est un processus au cours duquel il y'a une union entre les molécules d'un liquide (solvant) et les constituants (atomes, molécules ou ions) d'un corps solide, liquide ou gazeux (soluté), de manière à former un nouveau liquide homogène appelé solution. La dissolution est donc un processus physico-chimique qui se produit sans combinaison entre les particules de soluté et celles du solvant, mais qui peut aussi provoquer dans certains cas, la variation de température du milieu (Chang & Goldsby, 2014). Nous pouvons citer par exemple, la dissolution du sel ou du sucre dans l'eau selon les équations de dissolution suivantes :



$\text{NaCl}_{(s)}$  et  $\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_{6(s)}$  représentent respectivement les formules chimiques du chlorure de sodium (sel) et du glucose (sucre) à l'état solide (s) avant leur dissolution dans l'eau.  $\text{Na}^+_{(aq)}$  (ion sodium) et  $\text{Cl}^-_{(aq)}$  (ion chlorure) sont les ions formés en solution après la dissolution du sel dans l'eau et  $\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_{6(aq)}$ <sup>13</sup> les molécules de glucose libérées dans la solution après la dissolution du sucre dans l'eau.

De façon simplifiée, le processus de dissolution d'une substance moléculaire (soluté) dans un solvant (eau) se déroule en trois étapes distinctes :

- la première étape est la séparation (l'éloignement les unes des autres) des molécules du solvant ;
- la deuxième, la séparation des molécules du soluté qui se déroule simultanément avec la séparation des molécules de solvant. Au cours de ces étapes, les forces attractives intermoléculaires (l'interaction soluté-soluté) se rompent au profit de l'interaction solvant-soluté qui, dans certains cas, nécessite un apport énergétique ;
- la troisième et dernière étape, les molécules du solvant et du soluté se mélangent. Les particules de soluté se dispersent et occupent des positions qui devraient normalement

---

<sup>13</sup> Dans les deux cas, le solvant est l'eau et l'abréviation « aq », dans la parenthèse et en indice, veut tout simplement dire l'espèce chimique est dans une solution aqueuse.

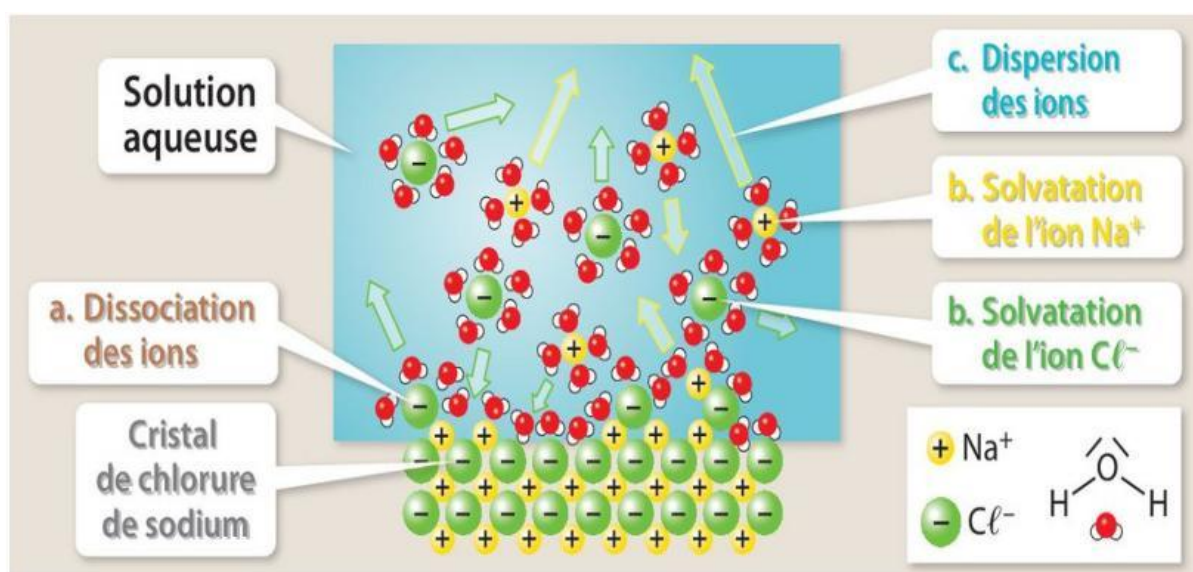
être occupées par les molécules du solvant (voir figure 14) (Chang & Goldsby, 2014 ; Hill et al., 2008).

De même, le processus de dissolution d'un composé ionique dans l'eau se déroule également en trois étapes :

- la dissociation ionique qui est la destruction du réseau cristallin du solide ionique par les molécules d'eau sous l'action des forces ion-dipôles, c'est-à-dire les attractions qui s'exercent entre les ions (cations ou anions) et les dipôles des molécules d'eau. Au cours de cette étape, les molécules d'eau polaires rompent les attractions ioniques qui maintiennent ensemble les ions dans le réseau cristallin du solide ionique, puis les attirent, les arrachent et les entraînent en solution aqueuse sous l'action des forces électrostatiques ion-dipôles qui se sont établies ;
- l'hydratation des ions, au cours de laquelle les molécules d'eau entourent progressivement les ions arrachés du réseau cristallin et présents dans la solution pour empêcher leur tendance à reformer le cristal ionique ;
- la dispersion des ions qui est l'étape finale du processus au cours de laquelle les ions entourés des molécules d'eau (ions hydratés) se répartissent progressivement dans la solution sous l'effet de l'agitation thermique ou mécanique (Brunori et al., 2019 ; Chang & Goldsby, 2014) comme l'indique le schéma de la figure 15.

**Figure 15**

*Schéma montrant la modélisation de la dissolution du chlorure de sodium (NaCl) dans l'eau (Brunori et al., 2019).*



Ce schéma modélise les constituants d'un soluté dissout dans un solvant. Cette modélisation rend possible la distinction à l'œil nu des particules solvatées de soluté lorsque la dissolution est totale. Or, plusieurs manuels et enseignants de chimie continuent d'utiliser de façon involontaire, le mot « disparition » pour expliquer le phénomène de dissolution au niveau macroscopique. Cela ne facilite pas toujours la compréhension de ce phénomène et par ricochet, celle de la concentration d'une espèce chimique en solution. Car comment pouvons-nous demander à un apprenant de déterminer la concentration de quelque chose qui n'existe plus ? D'où la nécessité d'utiliser un langage correct, en évitant surtout l'usage des mots qui prêtent à équivoque lorsque nous voulons enseigner ce concept aux apprenants.

Toutefois, puisqu'on ne peut dissoudre, à une température donnée, une certaine quantité maximale de soluté dans un certain volume de solvant appelée en chimie seuil de solubilité (Chang & Goldsby, 2014), il ne faut donc pas confondre une solution saturée et une solution concentrée. Une solution saturée est un mélange hétérogène dans lequel la limite de solubilité est atteinte, c'est-à-dire un mélange dans lequel nous pouvons observer à l'œil nu le reste de soluté solide non dissout qui s'est déposé au fond du récipient, parce que le processus de dissolution s'est arrêté. Dans ce cas, compte tenu de la nature hétérogène du mélange, il est recommandé de déterminer de préférence la solubilité au lieu de la concentration chimique.

Cependant, dans les industries chimiques et certains laboratoires de recherche, les solutions sont habituellement disponibles sous forme très concentrée pour des raisons de commodité, de transport et d'entreposage. Bien souvent, il est nécessaire de procéder à la dilution de ces dernières avant leur utilisation. C'est la raison pour laquelle nous allons aussi définir le concept de dilution qui est une notion très fondamentale dans la compréhension du concept de concentration chimique.

### **2.3. Définition de la dilution**

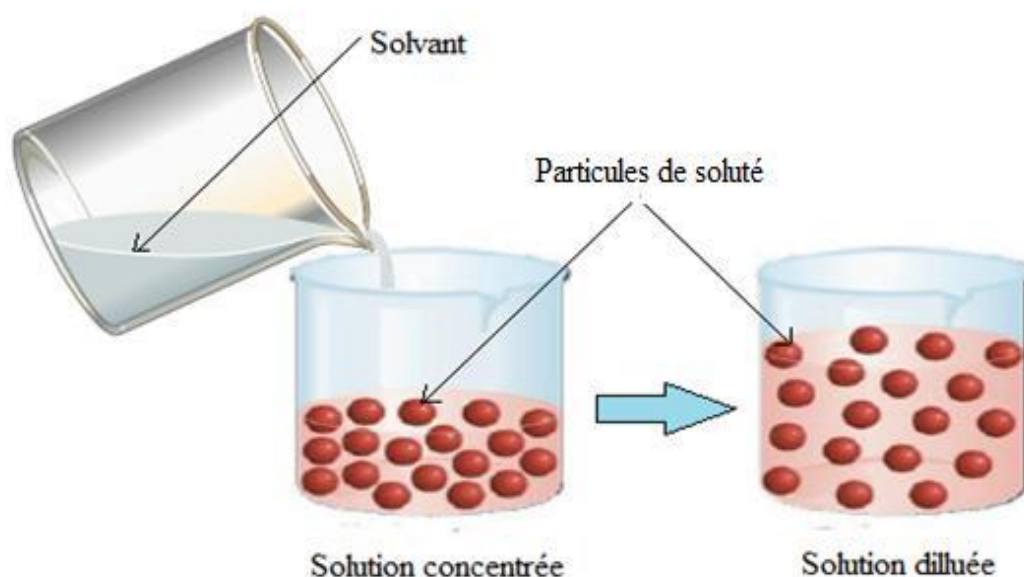
D'après le dictionnaire Rey (2010) la dilution est un nom d'action qui vient du latin « *dilutio* » qui signifie « action de laver » et au figuré « action de se justifier ». Par la suite, le concept de dilution s'est d'abord employé en médecine homéopathique pour désigner l'opération assurant la dispersion croissante d'une substance dans un solvant, puis avec l'acception générale correspondant au verbe diluer qui veut dire « étendre d'eau ou un liquide » ou sens figuré « amoindrir ou diminuer » la force de quelque chose.



En chimie, la dilution est une opération qui consiste à ajouter à une solution, une quantité appropriée de solvant de manière à obtenir une solution de concentration plus faible (Chang & Goldsby, 2014 ; Hill et al., 2008). D'après cette définition, nous constatons que le sens étymologique (action de laver ou de se justifier) du concept de dilution n'est pas pertinent en chimie comparativement à l'acceptation générale (amoindrir ou diminuer) qui lui est attribuée dans le langage commun et en médecine. Ainsi, au cours de l'opération de dilution, la quantité de soluté n'est pas modifiée alors que la concentration de la solution change (diminue), puisque le volume de la solution augmente comme l'indique le schéma de la figure 16.

**Figure 16**

*Schéma montrant la modélisation de la dilution d'une solution concentrée (Chang & Goldsby, 2014 ; Hill et al., 2008)*



D'après Hill et al. (2008) et Chang et Goldsby (2014), si  $C_{\text{conc}}$  et  $C_{\text{dil}}$  représentent respectivement les concentrations de la solution concentrée et de la solution diluée, et  $V_{\text{conc}}$  et  $V_{\text{dil}}$  les volumes de ces solutions, on peut écrire la relation suivante :

Quantité de matière de soluté =  $C_{\text{conc}} \times V_{\text{conc}} = C_{\text{dil}} \times V_{\text{dil}}$  ou encore  $C_{\text{conc}} \times V_{\text{conc}} = C_{\text{dil}} \times V_{\text{dil}}$ , car au cours de ce processus, la quantité de matière de soluté ne varie pas<sup>14</sup>.

Le concept de dilution est très important dans la compréhension du concept de concentration chimique, car c'est en 1888 lorsque le chimiste Friedrich Wilhelm Ostwald

<sup>14</sup> La quantité de matière de soluté avant dilution égale à la quantité de matière de soluté après dilution.

(1853-1932) établit la « loi de dilution », qui donne la variation du coefficient de dissociation en fonction de la concentration, qu'il évoque explicitement pour la première fois le concept de concentration en chimie. Il établit que dans le cas de la dissociation d'un sel AB de concentration C en ses ions, la constante de dissolution  $k_d$  est donnée par :

$k_d = (C\alpha)^2/C(1-\alpha)$  où  $\alpha$  représente le coefficient de dissociation (Ouertatani & Dumon, 2007). Dès lors, la notion de concentration commence à prendre de l'ampleur en chimie et devient de plus en plus importante à partir de 1903, où le même chimiste précise la teneur en ions hydrogène ( $H^+$ ) et oxhydrile ( $OH^-$ ) dans l'eau pure (une molécule-gramme des ions  $H^+$  et  $OH^-$  par dix millions de litres), soit  $10^{-7}$  mol.L<sup>-1</sup> en notation actuelle (Ouertatani & Dumon, 2007). Ainsi, nous pouvons prendre le risque de présumer que le concept de concentration en chimie s'est imposé grâce aux travaux d'Ostwald en électrolyse. Car plusieurs chercheurs s'accordent sur le fait que si les concepts comme le modèle de l'atome et la classification périodique ont une histoire bien définie de leur évolution jusqu'à ce jour, les notions comme la concentration, le tableau d'avancement et l'isomérisation n'ont pas d'histoire clairement définie (Ouertatani & Dumon, 2007).

Selon qu'une solution soit diluée ou très diluée, plusieurs modes d'expression sont utilisés par les chimistes pour exprimer la concentration. Dans la section suivante, nous présentons ces modes d'expression de la concentration et les formules qui leur sont associées.

#### 2.4. Types de concentration chimique

Les chimistes utilisent la concentration molaire volumique, la concentration massique, le pourcentage massique ou volumique, la fraction molaire et la molalité pour exprimer quantitativement la composition d'une solution. Ces modes d'expression de la concentration sont définis par Hill et al. (2008) ; Chang et Goldsby (2014) ; Boeyens-Volant et Warzée (2015) et Brochard-Wyart et al. (2016) de la manière suivante :

- La concentration molaire volumique notée C d'une solution aussi appelée molarité est le rapport entre la quantité de soluté (n) en moles et le volume de solution (V) en litres. Elle est déterminée par la formule  $C = \frac{n}{V}$  et son unité est mol/L ;
- La concentration massique noté  $C_m$  d'une solution est le rapport entre la masse (m) de soluté en gramme et le volume de solution (V) en litres. Elle s'exprime en g/L ou kg/m<sup>3</sup>. Son expression mathématique ou sa formule est  $C_m = \frac{m}{V}$ . Si la concentration

massique est multipliée par 100 %, nous obtenons une autre forme d'expression de la concentration à savoir le pourcentage masse/volume noté % m/V ;

- Le pourcentage massique (% m/m ou % p/p) est le rapport entre la masse d'un soluté et celle de la solution, multipliée par 100 %. Il est donné par  $\% \text{ m/m} = \frac{m_{\text{soluté}}}{m_{\text{solution}}} \times 100 \%$ . De la même façon, le pourcentage volumique (% V/V) représente le rapport entre le volume d'un soluté et le volume de la solution (exprimés dans les mêmes unités), multiplié par 100 %, c'est-à-dire  $\% \text{ V/V} = \frac{V_{\text{soluté}}}{V_{\text{solution}}} \times 100 \%$  ;
- La fraction molaire ( $x_i$ ) d'un constituant  $i$  est le rapport entre la quantité de matière du constituant  $i$  ( $n_i$ ) et la quantité de matière totale ( $n_t$ ) présentes dans une solution ou mélange. Sa formule est  $x_i = \frac{n_i}{n_t}$ . Elle est une grandeur sans dimension (pas d'unité) et toujours inférieure à 1, sauf si la solution est constituée d'un seul constituant pour qu'elle soit égale à 1. La somme des fractions molaires de tous les composants d'une solution est égale à 1. Lorsque la fraction molaire est multipliée par 100, on obtient une autre grandeur appelée pourcentage molaire ;
- La molalité ( $m$  ou  $b$ ) d'une solution est la quantité de matière de soluté par kilogramme de solvant (et non de solution). Elle est déterminée algébriquement par la formule  $m = b = \frac{n_{\text{soluté}}}{m_{\text{solvant en Kg}}}$  et s'exprime en mol/Kg, contrairement aux autres unités de la concentration chimique comme la molalité et le pourcentage massique qui ne sont pas liés au volume, mais plutôt à la masse ;
- Dans le cas de solutions très diluées, les concentrations sont exprimées souvent en « parties par million (ppm) », « parties par milliard (ppb) » et « parties par billion (ppt) ». 1 ppm correspond au nombre de parties de soluté par million de parties de solution ( $10^6$ ), 1 ppb quant à elle correspond au nombre de parties de soluté par milliard de parties de solution ( $10^9$ ) et enfin 1ppt au nombre de parties de soluté par billion de parties de solution ( $10^{12}$ ). Précisons ici que pour les solutions liquides, les parties par million, les parties par milliard et les parties par billion sont généralement établies en fonction de la masse. Ainsi, 1 ppm de soluté dans une solution correspond à 1 g de soluté dans  $1 \times 10^6$  g de solution. Dans le cas des solutions gazeuses, les parties par million, les parties par milliard et les parties par billion sont généralement établies en fonction du nombre de molécules ou du volume.

Le choix d'un mode d'expression de la concentration chimique dépend de ce que l'on veut mesurer. Par exemple, dans le domaine de la chimie, l'unité la plus utilisée pour exprimer la concentration est la concentration molaire volumique, car il est plus facile de mesurer le volume d'une solution à l'aide de ballons volumétriques précis que sa masse (Hill et al., 2008). D'où le fait que lorsqu'il est demandé de déterminer la concentration d'une solution, il s'agit de déterminer sa concentration molaire volumique dans la majorité des cas. Mais lorsqu'il s'agit d'analyser les polluants de l'air et de l'eau, ou de décrire les seuils de toxicité ou des normes de concentration jugées acceptables pour certains polluants, les parties par million (ppm) sont privilégiées (Chang & Goldsby, 2014). Par contre, dans les domaines médicaux et commerciaux, le pourcentage volumique ou massique et la concentration massique sont plus utilisés. Comme illustration, sur les bouteilles de bière, la concentration d'alcool est exprimée en pourcentage volumique (% V/V), le taux de gras dans le lait est habituellement exprimé en pourcentage massique (% m/m) et sur les bouteilles d'eau minérale les concentrations des ions qu'elles renferment sont exprimées en mg/L.

Cependant, l'observation d'une solution au niveau macroscopique ne permet pas toujours de connaître si les particules de soluté qu'elle contient sont des ions ou des molécules, ou un mélange des deux (niveau microscopique). Or, certaines propriétés des solutions et plus particulièrement celles des solutions aqueuses (point de congélation, conductibilité électrique des solutions, les couleurs des solutions, l'acidité et la basicité...), sont liées à la nature et à la concentration des particules que ces solutions contiennent. D'où la nécessité de savoir comment déterminer les concentrations des espèces chimiques présentes en solution (niveau microscopique) pour mieux interpréter ou expliquer les observations faites au niveau macroscopique. De plus, puisque notre recherche est principalement centrée sur la dimension microscopique de la concentration chimique, elle est présentée dans la partie suivante.

## **2.5. Concentration molaire volumique d'une espèce chimique en solution**

Par convention, les concentrations molaires volumiques des ions ou des molécules en solution sont représentées en utilisant les crochets [ ]. Ainsi, selon Hill et al. (2008), la concentration molaire volumique d'une espèce chimique  $i$  dans une solution notée  $[i]$  est le rapport entre la quantité de cette espèce ( $n_i$ ) en moles et le volume de solution ( $V$ ) en litres.

Algébriquement, elle est déterminée par la formule  $[i] = \frac{n_i}{V}$  et s'exprime en mol/L.

Pour déterminer la concentration d'une espèce chimique en solution, il faut d'abord écrire et équilibrer le(s) équation(s) de dissociation pour connaître la nature et la provenance des espèces chimiques en solution. Ensuite, regrouper toutes les espèces de même nature provenant de sources différentes s'il s'agit d'un mélange de plusieurs solutés. Enfin, calculer la concentration molaire volumique de chaque espèce (ions ou molécules) dans la solution (Hill et al., 2008). Notons que pour un type d'ion donné dans une solution, il n'y a qu'une seule concentration, même s'il provient de deux ou de plusieurs sources. En outre, dans le cas des solutions aqueuses ioniques obtenues par dissolution des solides ioniques dans l'eau, les ions (cations ou anions) en solution sont sous la forme hydratée pour éviter la tendance des ions à retourner à l'état cristallin (voir figure 15). Donc c'est par abstraction et par simplification que les chimistes ont opté pour la concentration d'un ion en solution comme s'il était en état libre dans ladite solution. Or, en réalité, chaque ion est sous la forme solvatée ou hydratée, c'est-à-dire il est entouré des molécules de solvant (eau).

## **2.6. Propriétés générales de la grandeur concentration chimique et définition retenue dans le cadre de notre étude**

Les différentes expressions de la concentration chimique présentées précédemment permettent de constater comme Willame et Snauwaert (2015) et Willame (2017) que la concentration chimique est un rapport (quotient de deux grandeurs) entre une partie d'un ensemble (le soluté) et cet ensemble (la solution). La concentration chimique est aussi une grandeur intensive. Mais la conception d'ordre générale attribuée à l'adjectif « intensive » à savoir ce « qui fait l'objet d'un effort intense » (Rey, 2010) ou « qui met en œuvre des moyens importants ; qui fait l'objet de gros efforts » (Larousse, 2017) nous éloigne du sens qui lui est attribué dans le domaine de la chimie. Elle renvoie plutôt à l'intensité (force ou puissance) d'une grandeur physique.

En revanche, une grandeur intensive en chimie est une grandeur qui ne dépend pas de la taille du système, c'est-à-dire une grandeur qui est indépendante de la quantité de matière (Brochard-Wyart et al., 2016). Leur propriété majeure est qu'elle est non additive et elle est définie de manière identique en chaque point d'un système homogène. En-dehors de la concentration chimique, nous avons aussi la pression, la température, la masse volumique, la capacité calorifique molaire, etc. Par exemple, si on réunit deux solutions à des concentrations différentes ou deux corps à des températures différentes, la concentration ou la température finale n'est pas la somme de leurs valeurs initiales. Plus explicitement, si

nous additionnons par exemple une solution contenant 0,2 mol/L d'ions  $\text{Na}^+$  avec une autre contenant 0,5 mol/L d'ions  $\text{Na}^+$ , la concentration finale d'ions  $\text{Na}^+$  dans le mélange obtenu ne sera pas égale à la somme des concentrations du départ (0,7 mol/L). Elle sera plutôt égale au quotient du rapport entre la quantité totale de matière d'ions  $\text{Na}^+$  et le volume final de la solution obtenue et comprise entre 0,2 mol et 0,5 mol. Cela n'est pas le cas pour les grandeurs extensives<sup>15</sup> comme le volume, la masse, l'enthalpie, l'entropie pour ne citer que celles-ci, qui s'additionnent lorsqu'on réunit deux systèmes. Par exemple, si nous additionnons 10 g et 20 g de sels, nous obtenons 30 g de sels.

Compte tenu de ce qui précède, dans le cadre de notre recherche la concentration molaire volumique d'une espèce chimique en solution aqueuse, l'objet de notre investigation, est définie comme une grandeur intensive qui est égale au rapport entre deux grandeurs extensives à savoir, la quantité de matière ( $n$ ) en moles de l'espèce chimique en solution et le volume de solution ( $V$ ) en litres.

### 3. Processus enseignement/apprentissage

Le processus enseignement-apprentissage est un tandem dans lequel les activités de l'enseignant et celles du sujet apprenant (élève) sont étroitement et réciproquement articulées pour permettre à l'élève de construire de nouvelles connaissances sur la base de ses connaissances préconçues, en interagissant avec ses pairs, avec l'enseignant et avec le savoir à apprendre (Jonnaert & Vander Borght, 2008). En d'autres termes, c'est un processus qui, non seulement, permet de construire des nouvelles connaissances, mais il permet aussi à l'élève de confronter ses connaissances existantes à des situations qui, parfois, les fragilisent et les remettent en question. Ces situations sont créées par l'enseignant.

Dans le tandem enseignement-apprentissage, le volet enseignement et le volet apprentissage, sont solidement liés. La didactique s'occupe ainsi du volet apprentissage (construction des connaissances disciplinaires et des rapports de l'apprenant au savoir), tandis que la pédagogie s'occupe, à son tour, de la mise en scène de l'action didactique (actions de l'enseignant). En contexte scolaire et suivant la perspective constructiviste, l'apprentissage reste principalement sous la responsabilité de l'élève et en aucun cas, l'enseignant ne peut se substituer à ce dernier. Compte tenu du fait que l'apprentissage peut exister indépendamment de l'enseignement dans des situations non-didactiques par exemple

---

<sup>15</sup> Une grandeur extensive est une grandeur qui dépend de la taille ou de l'étendue du système, c'est-à-dire une grandeur qui est proportionnelle à la quantité de matière (Brochard-Wyart, et al., 2016).

(Jonnaert & Vander Borgh, 2008) et que, aussi, notre recherche s'inscrit principalement en didactique des disciplines, et vise principalement à améliorer la compréhension des apprenants sur le concept de concentration chimique, nous allons plus nous appesantir sur le volet apprentissage qui intègre implicitement en son sein le processus d'enseignement.

### **3.1. Concept d'apprentissage**

Pour mieux saisir l'entendement commun et l'entendement scientifique qui sont attribués au concept d'apprentissage, afin de proposer une définition opérationnelle qui cadre avec notre sujet d'étude, nous allons parcourir les définitions proposées par : les dictionnaires de la langue française, les dictionnaires spécialisés de l'éducation, certaines orientations qui ont fortement influencé les théories de l'apprentissage et la perspective neurodidactique appliquée à l'apprentissage des sciences qui est notre cadre théorique d'étude.

#### **3.1.1. Conception de l'apprentissage dans le sens commun du langage**

D'après les dictionnaires Rey (2010) et Larousse (2017), le mot apprentissage dérive du nom « apprenti » qui signifie « formation technique et artisanale » ou le « temps où l'on est apprenti ». C'est-à-dire une personne jeune qui apprend un métier artisanal chez un encadreur ou dans un centre d'apprentissage. Il est aussi défini comme une acquisition ou une accumulation d'un ensemble de connaissances. Étymologiquement, le mot apprentissage vient du verbe « apprendre » qui dérive du mot latin « *apprehendere* » qui signifie appréhender. Le verbe apprendre signifie « saisir par l'esprit », « acquérir pour soi des connaissances » ou encore « donner à autrui des connaissances » Rey (2010).

Le sens attribué au concept apprentissage dans la langue française, c'est-à-dire l'acquisition ou l'accumulation d'un ensemble de connaissances dans un domaine précis, montre tout simplement que l'apprentissage, dans l'entendement commun, est plus considéré comme un « état » que comme un « processus ». Cette conception est plus pertinente dans le champ professionnel que dans le domaine scolaire. Puisque apprendre, dans le champ des activités professionnelles, c'est ne pas d'abord assimiler des savoirs comme c'est le cas dans le domaine scolaire, mais c'est apprendre à agir de façon durable et efficace, bien que les savoirs professionnels, techniques ou scientifiques ne disparaissent pas du paysage organisation de la formation (Reuter et al., 2007). De même, « donner à autrui des connaissances » qui est attribué au verbe « apprendre » dans la langue française peut, dans une certaine mesure, renvoyer plutôt au sens du verbe « enseigner » dans le contexte

scolaire. Ce qui est susceptible de créer la confusion entre les deux, bien qu'ils aient des liens qui sont évidents.

Ces visions du concept d'apprentissage sont très réductrices et, par conséquent, elles ne nous fournissent pas assez d'éléments pour comprendre le concept apprentissage dans le domaine scolaire qui est notre milieu de recherche. Dans le domaine de l'éducation, les conceptions de l'apprentissage sont multiples et elles dépendent parfois de chaque champ de recherche. C'est la raison pour laquelle, nous allons étendre notre champ définitionnel au-delà des dictionnaires de la langue française pour l'examiner suivant les grandes orientations des théories de l'apprentissage dans le champ de la psychologie cognitive et suivant quelques dictionnaires spécialisés d'éducation.

### **3.1.2. Conception de l'apprentissage dans le domaine scolaire suivant certains dictionnaires de l'éducation.**

En pédagogie, l'apprentissage est défini comme : « *l'ensemble des activités, mis à la disposition du sujet par l'agent ou planifié par le sujet lui-même, susceptible de déclencher un processus interne chez le sujet en vue de l'atteinte d'objectif* » (Legendre R., 2000, p. 68). Le sens donné au concept d'apprentissage en pédagogie demeure toujours général comme dans le sens commun du langage. Il ne nous fournit pas toujours assez d'éléments informatifs pour saisir le concept d'apprentissage dans le contexte scolaire qui est notre milieu de recherche. Par exemple, nous avons : les objets d'apprentissage (les savoirs), la dimension interactive de l'apprentissage (interaction entre les savoirs à acquérir et les connaissances propres de l'apprenant), la dimension sociale de l'apprentissage (interaction entre l'apprenant, son enseignant et ses pairs à propos de l'objet d'apprentissage) (Jonnaert & Vander Borgh, 2008), qui font partie des éléments fondamentaux de l'apprentissage scolaire et qui ne sont pas pris en compte dans ladite définition. Ce sens, qui lui est attribué, peut aussi, dans une certaine mesure, entraîner une confusion entre le concept d'apprentissage et celui d'enseignement bien que les deux, comme nous l'avons montré au début de cette partie, soient étroitement liés. Par conséquent, cette conception de l'apprentissage peut renvoyer à l'approche selon laquelle l'apprentissage consisterait alors en une simple accumulation de connaissances nouvelles par l'apprenant qui n'est qu'un contenant vide qu'il suffirait de remplir (Alexandre, 2017). Malheureusement, l'approche dite transmissive qui conçoit qu'il suffit d'apporter les savoirs à un apprenant de bonne volonté pour que ce dernier se les approprie, qui a longtemps dominé l'apprentissage en



milieu scolaire, continue à s'imposer, parfois à l'insu des enseignants, comme un réflexe professionnel dominant.

Le caractère général de l'apprentissage, ne prenant pas en compte certains critères spécifiques liés au contexte scolaire, nous amène à poursuivre notre investigation. D'après le Grand dictionnaire de la psychologie, l'apprentissage est défini comme :

*Une modification de la capacité d'un individu à réaliser une activité sous l'effet des interactions avec son environnement. Selon le contexte, le terme désigne le processus ou le résultat du processus. Il est généralement entendu que la modification consiste en un progrès. Dans les sciences de l'éducation, c'est une modalité d'acquisition des connaissances, des compétences ou des aptitudes. (Bloch et al., 1999, p. 73)*

Pour Bloch et al. (1999), le terme « capacité » renvoie à des caractéristiques inobservables du psychisme qui peuvent être : les savoirs, les automatismes, les attitudes, etc. Les activités considérées, quant à elles, sont très diverses et elles peuvent aller de l'adaptation biologique au milieu à la manipulation de symboles. De plus, les modifications inobservables du psychisme suite à un apprentissage complexifient l'étude du processus d'apprentissage. Pour Henriette Bloch et ses collaborateurs, l'étude du processus d'apprentissage ne peut être faite de manière indirecte qu'au travers des modifications de la performance observée dans une situation appropriée. Et les indicateurs reliés à la performance qui permettent d'inférer sur les mécanismes et la nature des changements du psychisme responsables des modifications constatées sont : l'évolution du nombre de bonnes réponses ou de la latence de la réponse, l'analyse de la nature des erreurs, l'analyse de la procédure (raisonnement) adoptée pour ne citer que ceux-là (Bloch et al., 1999).

Similairement, au Grand dictionnaire de la psychologie, le Dictionnaire actuel de l'éducation de Renald Legendre aborde le concept dans le même sens. Il définit également l'apprentissage comme un processus et le produit d'un processus. En tant que processus, il est défini comme :

*Un processus d'acquisition ou de changement, dynamique et interne à une personne, laquelle, mue par le désir et la volonté de développement, construit de nouvelles représentations explicatives cohérentes et durables de son réel à partir de la perception de matériaux, de stimulations de son environnement, de l'interaction entre les données internes et externes au sujet d'une prise de conscience personnelle. (Legendre R., 2000, p. 67)*

Pour Rénald Legendre, le processus enseignement-apprentissage comporte trois phases : la première phase est la phase motivationnelle qui donne à l'apprenant une image de ce que l'apprentissage lui permettra de réaliser. C'est au cours de cette phase que l'attention de l'élève est captée pour susciter sa curiosité et provoquer en lui une attitude d'ouverture face aux objets d'enseignement. La deuxième phase est la phase d'acquisition au cours de laquelle les préalables sont rappelés, suivi de la présentation de l'objet d'enseignement à l'apprenant. La troisième et dernière phase est la phase de performance au cours de laquelle la vérification des acquis de l'apprenant est faite. Ces étapes montrent la forte implication de l'enseignant dans le processus de construction de connaissances par le sujet apprenant.

Et en tant que produit d'un processus, Rénald Legendre définit, cette fois-ci, l'apprentissage comme :

*La résultante d'un cheminement d'évolution chez un sujet et qui peut se traduire entre autres par: l'acquisition de connaissances, le développement d'habiletés ou d'un savoir-faire, l'adoption de nouvelles attitudes, de nouvelles valeurs, de nouvelles orientations cognitives, des nouveaux intérêts, ou d'un savoir-être. (Legendre R., 2000, p. 67)*

En d'autres termes, l'apprentissage est conçu suivant cette dimension comme le résultat de la progression d'un apprenant suivant les objectifs bien déterminés à travers un cours ou un programme et qui s'opère avec l'aide d'autres sujets et de procédés ou d'instruments qui sont à sa disposition dans un environnement donné.

En réunissant les deux dimensions du concept d'apprentissage (un processus et le produit d'un processus), Rénald Legendre conçoit l'apprentissage comme :

- un processus intérieur à la personne, c'est-à-dire un changement personnel qui nécessite le consentement, à tout le moins tacite, de l'individu concerné ;
- une synthèse et une réorganisation cohérente et logique de la structure en place suite à l'intégration de nouveaux éléments ;
- un processus tributaire de l'environnement du sujet, de son degré motivationnel et de la nature du contrat ou de ses relations avec l'agent ;
- un processus qui incombe à l'enseignant la responsabilité de créer un environnement propice à l'apprentissage, car l'apprentissage aura lieu si et seulement les composantes (sujet, savoir, enseignant et milieu d'apprentissage) sont en harmonie ;
- un processus qui débouche sur la pensée (c'est-à-dire de nouveaux objets mentaux) ;

- un processus continu de déséquilibre et de désintégration puis d'équilibre et de synthèse suite à une période plus ou moins longue d'incertitude (angoisse) et de flottement devant conduire à de nouvelles structures plus évoluées.

Tout comme Bloch et al. (1999) en psychologie, dans le domaine des sciences de l'éducation Rénald Legendre attire notre attention sur le fait qu'on ne peut pas évaluer directement le processus d'apprentissage, puisqu'il est interne à un apprenant et inaccessible de l'extérieur. Pour lui également, on ne peut qu'inférer qu'il y a eu ou non un apprentissage en observant avant et après les comportements du sujet, c'est-à-dire en appréciant le produit de l'apprentissage que Bloch et al. (1999) ont appelé en psychologie, la performance. À ce sujet, les facteurs identifiés par Legendre qui peuvent influencer la performance d'un apprentissage sont multiples tant du côté de l'élève que du côté de l'enseignant ou de l'environnement scolaire dans lequel se déroule un apprentissage. Par exemple : le style affectif, le style cognitif, le style d'apprentissage, la structure cognitive et le développement cognitif ; les facteurs sociaux et familiaux tels que les relations des élèves entre eux, les relations entre élèves-enseignants, les relations parents-enfants, la diversité des expériences vécues ; l'ambiance générale qui règne dans la salle de classe, les programmes d'étude et le matériel didactique, etc.

Ces définitions données au concept d'apprentissage par Bloch et al. (1999) et Legendre (2000) siéent bien avec le contexte scolaire et elles nous fournissent pas mal d'outils conceptuels pour mieux appréhender l'apprentissage dans ce contexte. Par contre, elles demeurent toujours générales en ce qui concerne l'objet d'apprentissage. Elles parlent d'acquisition de nouvelles informations ou de nouvelles connaissances de manière générale sans, toutefois, spécifier leur nature. Or, dans le cadre de la didactique des disciplines, champ disciplinaire dans lequel la présente recherche s'inscrit, ces « connaissances ou informations nouvelles » se résument plus aux contenus ou aux savoirs disciplinaires.

Eu égard à ce qui précède, Reuter et ses collaborateurs, dans le domaine de la didactique, vont plus loin en concevant l'apprentissage, dans le « Dictionnaire des concepts fondamentaux des didactiques », comme un processus ou le résultat du processus au cours duquel les apprenants acquièrent ou ont acquis les contenus d'enseignement (savoirs, savoir-faire, etc.) dans chaque domaine disciplinaire. À ce sujet, ils écrivent :

*Les usages du mot « apprentissage » en didactique sont divers, même s'ils renvoient tous à un contenu conceptuel proche. D'abord, il convient de distinguer deux sens du mot :*

*l'apprentissage comme processus (le fait d'apprendre); l'apprentissage comme résultat ou effet du processus (le fait d'avoir appris). D'autre part, on peut préciser ou non l'objet de l'apprentissage : on parle de l'apprentissage de tel ou tel contenu, plus ou moins précisément (par exemple : l'apprentissage du calcul, de la lecture ou plus spécifiquement encore, l'apprentissage des fractions, de la relation sujet-verbe...). Corollairement à cette distinction, on peut considérer l'apprentissage à long terme (quand on dit par exemple que l'école est un lieu d'apprentissage) ou à plus court terme (quand on parle de l'apprentissage visé dans telle situation didactique).* (Reuter et al., 2007, pp. 17-18)

Pour Reuter et al. (2007), l'apprentissage scolaire implique un enseignement intentionnel. Ils recommandent, à ce sujet, d'en tenir compte de certaines spécificités lors de la mise en œuvre du processus d'apprentissage telles que :

- la dépendance directe de l'apprentissage aux facteurs de la programmation didactique (cursus scolaire) tels que l'âge de l'apprenant et la logique disciplinaire;
- la contraignance de l'apprentissage à l'endroit de l'apprenant, étant donné que l'apprentissage s'impose préalablement à lui en raison de son statut d'élève même s'il refuse délibérément ou non, d'apprendre ;
- le contexte du milieu organisationnel de l'apprentissage à savoir : la salle de classe où l'élève n'est pas isolé, mais il interagit avec son environnement (camarades, enseignant, savoirs, etc.), le temps et la mise en place de situations didactiques.

Jonnaert et Vander Borgh (2008), dans la même perspective, vont plus en profondeur dans leur analyse en proposant de structurer l'apprentissage dans le contexte scolaire autour des points pivots suivants :

- l'apprentissage scolaire est un processus qui se vit dans un cadre spatio-temporel de l'école avec ses contraintes et ses ressources ;
- l'apprentissage scolaire porte sur des objets spécifiques qui sont des contenus des programmes scolaires (savoirs codifiés, savoir-faire, savoir-être...) codifiés sous le nom générique de « savoirs » ;
- l'apprentissage scolaire a pour objectif la construction de connaissances par l'apprenant à propos d'un savoir clairement identifié et validé par un processus de transposition didactique. Pour être construit ou appris, ce savoir doit être mis en situation telle que les connaissances de l'apprenant puissent entrer en interaction avec ce dernier. Ladite construction, selon Rees et Newton (2020), doit aboutir à la pensée créative qui est la construction d'une compréhension significative, originale, plausible

ou appropriée des concepts scientifiques selon le contexte et qui doit, si possible, être cognitivement économique ;

- l'apprentissage scolaire doit être localisé dans une zone de dialogue interactive. Cette zone est elle aussi définie par un contrat didactique qui peut être renégocié à tout moment en fonction des circonstances. Dans cet espace de dialogue, l'apprentissage se réalise à travers les interactions sociales de l'apprenant avec l'enseignant et avec ses pairs à propos du savoir qui fait l'objet d'apprentissage. Lev Vygotski surnomme cette zone de dialogue la zone proximale ou prochaine de développement (ZPD). Il la considère comme la distance entre le niveau de développement actuel déterminant la capacité de l'enfant à résoudre seul les problèmes et le niveau de développement potentiel déterminant la capacité de l'enfant à résoudre les problèmes avec l'aide d'un adulte (enseignant) ou des pairs (apprenants plus avancés que lui) (Vygotski, 2019). Cette distance entre ce que l'enfant peut apprendre seul et ce qu'il peut apprendre uniquement avec l'aide d'un tuteur (Ayina Bouni, 2013) est tout simplement la capacité d'un apprenant à réaliser seul ou avec un peu d'aide une action avec moins de difficulté ;
- l'apprentissage scolaire se réalise à travers l'activité métacognitive de l'apprenant, c'est-à-dire un travail réflexif de ce dernier sur ses propres connaissances qui sont en interaction avec le savoir mis en situation ;
- l'apprentissage scolaire s'enclenche si et seulement si l'apprenant est motivé. Pour cela, l'enseignant doit mettre en œuvre tous les moyens qui favorisent des interactions entre « savoir » et « connaissances » ;
- l'apprentissage scolaire est réussi lorsque l'apprenant opère un transfert de connaissances, c'est-à-dire lorsque l'apprenant utilise spontanément ses nouvelles connaissances construites dans des situations non-didactiques.

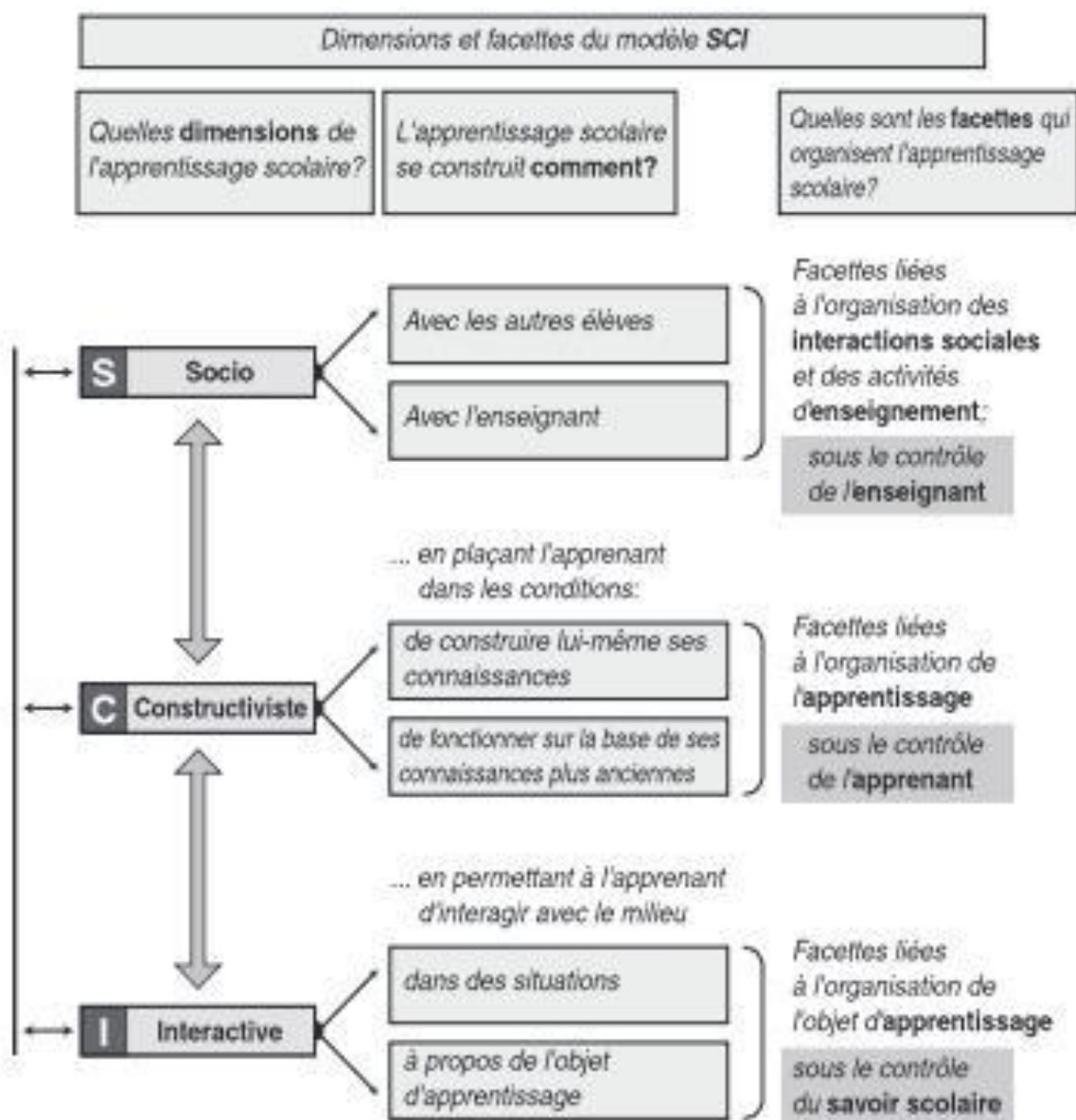
Toutes ces spécificités de l'apprentissage scolaire ont conduit à la définition opérationnelle suivante :

*L'apprentissage scolaire est un processus dynamique par lequel un apprenant, à travers une série d'échanges avec ses pairs et l'enseignant, met en interaction ses connaissances avec des savoirs dans l'objectif de construire de nouvelles connaissances adaptées aux contraintes et aux ressources de la situation à laquelle il est actuellement confronté dans l'objectif d'utiliser ses nouvelles connaissances dans des situations non-didactiques. (Jonnaert & Vander Borgh, 2008, p. 266)*

Cette définition didactique opérationnelle du concept d'apprentissage scolaire proposée par Jonnaert et Vander Borgh (2008) montre qu'il s'agit d'un processus social, constructif et interactif très complexe et dynamique. Ces derniers lui ont donné le nom de modèle socioconstructiviste et interactif (modèle SCI) de l'apprentissage en contexte scolaire. La « dimension sociale » permet la prise en considération des acteurs en présence ; la « dimension interactive » permet à l'apprenant de mettre ses connaissances en interaction avec l'objet d'apprentissage (savoir codifié, savoir-être, savoir-faire...) ; et la « dimension constructive » est l'activité réflexive de l'apprenant sur ses propres connaissances appelée par Flavell (1985) et Tardif (1997) : la métacognition. Il est aussi associé à chaque dimension, un ensemble de fonctions qui permettent de définir les conditions de l'apprentissage scolaire comme l'indique le schéma de la figure 17. Ces fonctions, à assurer par chacun des acteurs impliqués dans le processus d'apprentissage, sont appelées par Jonnaert et Vander Borgh les facettes de l'apprentissage en contexte scolaire.

**Figure 17**

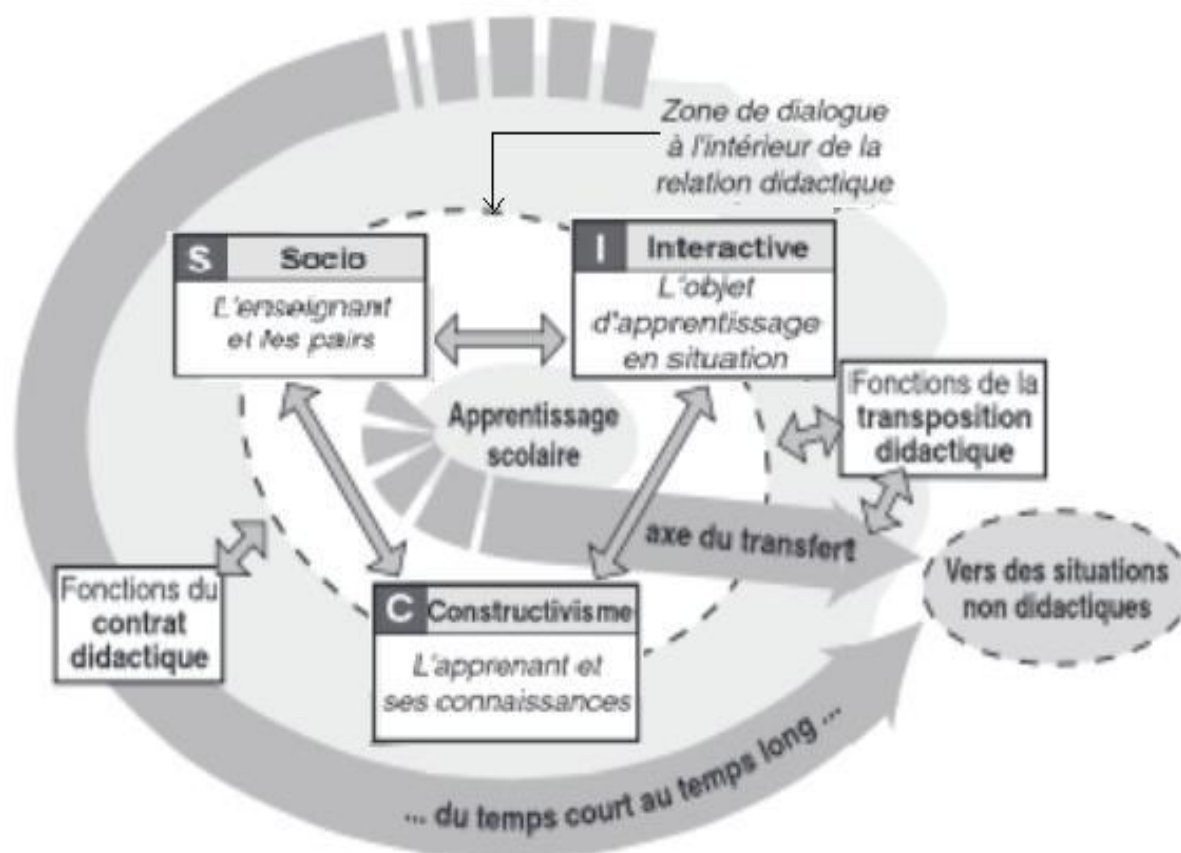
*Dimensions et facettes de l'apprentissage scolaire suivant le modèle SCI proposé par Jonnaert et Vander Borgh (2008, p. 230)*



Ces trois dimensions de l'apprentissage scolaire suivant le modèle SCI sont, elles aussi, en interaction évolutive en fonction du temps similairement à celle des trois sommets (pôle enseignant, pôle élève et pôle du savoir) du triangle didactique comme l'indique le schéma de la figure 18.

**Figure 18**

*Illustration du dynamisme évolutif temporel de l'apprentissage scolaire suivant le modèle SCI proposé par Jonnaert et Vander Borgh (2008, p. 232)*



Le dynamisme temporel de l'apprentissage scolaire suivant le modèle SCI montre que si les savoirs appris à l'école par les élèves n'aident pas ces derniers dans leur biotope, ils deviennent obsolètes aussitôt que cesse le temps court de la relation didactique. L'acte d'apprendre doit donc déboucher sur l'utilisation des connaissances construites par le sujet apprenant au-delà des situations didactiques qui ont permis l'apprentissage. Ainsi, pour Jonnaert et Vander Borgh (2008), l'efficacité ou la pertinence des apprentissages faits dans le contexte scolaire n'est jugée qu'en fonction de l'utilisation, par l'apprenant, de ses nouvelles connaissances construites dans des situations non-didactiques. C'est-à-dire l'utilisation que ce dernier fait de ce qu'il a appris à l'école, hors du contexte scolaire et dans le contexte scolaire lui-même. S'il en fait un bon usage, c'est-à-dire qu'il les mobilise dans des situations conceptuellement problématiques par exemple, l'on dira qu'il a opéré au cours



de son apprentissage un transfert des apprentissages<sup>16</sup> qui est l'étape supérieure du développement cognitif, pour ne pas dire, la finalité du processus d'apprentissage scolaire : c'est le développement de nouvelles compétences. Mais s'il ne parvient pas à mobiliser les connaissances construites dans des situations conceptuellement problématiques ou non-didactique, l'apprentissage n'est pas encore réussi. Des efforts constructifs s'imposent encore à ce dernier. Pour ce faire, la transposition didactique, en dehors d'assurer le rôle de la validation des savoirs, comme nous l'avons montré au niveau de la problématique, doit aussi exercer la fonction d'évaluation en vérifiant si les connaissances construites sont vraiment transférables ou utilisables. Et complémentaiement aux fonctions de la transposition didactique, le contrat didactique qui, à son tour, définit l'espace de dialogue et d'interaction entre les différents acteurs de la relation didactique, permet aussi de réguler les rapports que chaque acteur entretient au savoir (Jonnaert & Vander Borgh, 2008). Mais avant de conclure cette partie sur les apprentissages scolaires, faisons un bref détour pour apprécier comme le concept d'apprentissage a été traité dans le champ de la psychologie cognitive, générateur des différentes théories qui régissent le fonctionnement cognitif du processus d'apprentissage. Dans le cadre de ce crochet, seulement le volet développement des apprentissages scientifiques nous intéressera.

### **3.1.3. Conception de l'apprentissage scolaire suivant les grandes orientations des théories de l'apprentissage dans le champ de la psychologie cognitive.**

Dans le domaine des apprentissages scientifiques, Rogalski (2015) a catégorisé les théories de l'apprentissage suivant deux grandes orientations : les théories centrées sur la mémoire et le traitement de l'information et les théories centrées sur le développement des connaissances par l'activité directe du sujet ou via la médiation d'autrui.

Les théories centrées sur le traitement de l'information via la mémorisation correspondent de façon globale au modèle « j'apprends, j'applique » (Rogalski, 2015). Elles présument que l'élève apprend lorsqu'il passe de la répétition d'une notion mémorisée à sa mobilisation pour exécuter une tâche, puis étend la procédure utilisée dans ladite exécution, et de façon régulière, à la résolution d'autres tâches similaires afin de la renforcer pour qu'elle devienne automatique. Selon Janine Rogalski, ces théories fonctionnent généralement sur la base de deux types de mémoire : la mémoire des éléments factuels, dite

---

<sup>16</sup> La mobilisation et l'adaptation des connaissances construites pour résoudre les problèmes ou pour réaliser des tâches dans un contexte nouveau et inhabituel.

« déclarative » qui permet à l'apprenant, par exemple, de mémoriser par cœur les définitions des concepts scientifiques) et la mémoire des procédures dite « procédurale » qui permet à l'apprenant de répéter une procédure acquise afin de la renforcer pour qu'elle devienne automatique (Rogalski, 2015). Les techniques qu'elles utilisent sont celles de la méthode de conditionnement dite « behavioriste » qui a fortement influencé le milieu éducatif anglo-saxon comme les Etats-Unis (Rogalski, 2015), et qui facilite la consolidation des acquis d'un point de vue didactique.

Les théories centrées sur le développement des connaissances par l'activité directe du sujet ou via la médiation d'autrui (courant piagétien et vygotkien) mettent l'accent plutôt sur la conceptualisation (Rogalski, 2015), c'est-à-dire la construction conceptuelle profonde des objets d'enseignement et d'apprentissage (les concepts scientifiques comme la concentration chimique par exemple). Or, cette dimension de l'apprentissage qui est au cœur de la démarche développementale de connaissances n'est pas prise en compte dans la première catégorie. Pour les théoriciens de l'apprentissage basé sur la démarche dite développementale, l'apprentissage d'un concept n'est pas seulement le fait de la mémoriser, mais un processus cognitif actif et constructif qui nécessite la prise en compte des connaissances antérieures ou alternatives du sujet qui apprend (Alexandre, 2017 ; Rogalski, 2015 ; Tardif, 1997) comme nous l'avons déjà montré précédemment. Par conséquent, la mémorisation d'une notion ne confère pas toujours à l'apprenant la capacité de la comprendre significativement ou, encore, la capacité de la catégoriser ontologiquement (Rogalski, 2015), mais présumément, plutôt, la capacité d'automatisation de la procédure développée au cours du processus constructif de ladite notion. Ainsi, au travers de la conceptualisation, les théoriciens de la démarche développementale des connaissances mettent au centre de leur approche la construction conceptuelle d'une connaissance fine en prenant en compte: le développement cognitif général (la pensée et le raisonnement), le processus mémorial de la cognition (cadre central du cognitivisme) et les interactions sociales (cadre important du socioconstructivisme). Ils émettent l'hypothèse selon laquelle, pour qu'un apprenant puisse traiter une situation, il doit être suffisamment capable d'assimiler la situation à ce qu'il connaît déjà pour commencer à la traiter, mais sans toutefois avoir la quasi-totalité des notions nécessaires pour aboutir directement à la solution (Rogalski, 2015).

D'un point de vue didactique, la mise en œuvre de cette hypothèse en contexte réel d'apprentissage scolaire doit tenir compte :

- du processus cognitif lié au système mémorial du traitement de l'information de l'apprenant lorsqu'il acquiert et intègre de nouvelles connaissances dans son cerveau. Suivant cette conception cognitiviste, l'apprentissage est conçu comme une construction graduelle des connaissances qui se fait par la mise en relation des connaissances antérieures et des nouvelles informations liées aux concepts à acquérir (Tardif, 1997). D'une part, compte tenu du caractère volatil de ces nouvelles informations, elles ne deviennent des connaissances stables que si des liens solides s'établissent avec ce que l'apprenant savait déjà suivant un processus cognitif personnel d'intégration et d'organisation qui lui est spécifique et que personne d'autre ne peut le faire à sa place (Alexandre, 2017). D'autre part, étant donné les limites de la structure cognitive de l'apprenant et les caractéristiques parfois abstraits des concepts à acquérir par ce dernier, il ne peut pas retenir intégralement toutes les phrases, tous les exemples, tous les textes, toutes les illustrations, tous les exercices que l'enseignant met à sa disposition pour favoriser son apprentissage. Il doit donc, à cet effet, sélectionner dans cet ensemble pour faire un montage ou une construction qui conserve l'essentiel des informations en assurant une compréhension adéquate du réel pris en considération (Tardif, 1997) ;
- processus constructif personnel selon lequel la construction des notions visées par l'apprentissage va naturellement émerger de l'activité individuelle. Suivant cette perspective piagétienne de l'apprentissage, le développement des connaissances nouvelles nécessite de mettre l'apprenant dans les bonnes situations pour que ce dernier puisse interagir avec l'objet d'apprentissage, qui est précisément dans le cadre de cette recherche, le concept de concentration chimique. D'autres dimensions implicatives de l'approche piagétienne de l'apprentissage ne seront pas évoquées ici, car comme l'a si bien relevé Ayina Bouni (2013), elles sont difficilement applicables en contexte scolaire de par leur cadre expérimental d'émergence ;
- du processus constructif interactif où la construction des connaissances nouvelles émerge des interactions entre élèves, élève-tuteur et élève-objet d'apprentissage ; bref, des interactions en classe. Cette conception vygotkienne de l'apprentissage présume que le développement cognitif va se faire par une dialectique entre concepts quotidiens et concepts scientifiques enseignés dont l'intervention éducative doit se faire crucialement dans la zone proximale de développement de l'enfant (ZPD) (Rogalski,

2015). Vygotski justifie cela par le fait que les concepts quotidiens sont « gorgés de sens », mais faiblement structurés, alors que les concepts scientifiques sont fortement organisés, abstraits et très loin de l'expérience de l'apprenant. Ce qui implique un mouvement double du développement cognitif qui peut se faire à partir des concepts quotidiens qui se développent par l'activité dans des expériences vécues par le sujet apprenant (germination par le bas) ou par attraction des concepts quotidiens vers ceux de la connaissance scientifique (germination par le haut) grâce aux activités menées dans le cadre d'une instruction formelle (Vygotski, 2019). Ce processus est aussi issu du constructivisme néopiagétien<sup>17</sup> qui conçoit aussi le développement cognitif comme un mouvement double émergent de l'activité propre de l'élève et de l'activité de l'enseignant qui « tire vers le haut » la connaissance de l'élève vers les contenus visés (Rogalski, 2015). Et dans ce processus, l'enseignant « étaye<sup>18</sup> » la construction de nouvelles connaissances, non seulement en disant quoi faire et comment, mais également en aidant l'élève à repérer l'objectif visé par la situation, à identifier ce qu'il a déjà su produire et en lui donnant des outils pour réfléchir à ce qu'il a fait (Rogalski, 2015).

De façon générale, contrairement aux approches psychologiques centrées sur la mémorisation et le traitement de l'information, les approches dites développementales de

---

<sup>17</sup> Courant de pensée psychologique qui critique Piaget sur son excès de structuralisme en exprimant la nécessité théorique de mettre le fonctionnement du cerveau au centre de la problématique des apprentissages et pas seulement les structures des connaissances antérieures. Car pour Piaget, le développement et l'apprentissage étaient deux processus différents, l'apprentissage ne pouvant pas modifier les processus développementaux. En formulant ces critiques, les défenseurs de ce courant rejoignaient ainsi l'approche vygotkienne des processus développementaux, selon laquelle un processus d'instruction fondé sur un cadre psychologique pourrait fortement stimuler le développement de l'enfant, permettant à de jeunes enfants d'acquérir de nouvelles formes de pensée (Rogalski, 2015).

<sup>18</sup> L'étayage est un concept psychologique développé par le psychologue américain Jérôme Bruner (1915 – 2016) défini comme l'ensemble des interactions d'assistance de l'adulte permettant à l'apprenant d'apprendre à organiser ses conduites afin de pouvoir résoudre seul un problème qu'il ne savait pas résoudre au départ. Il est étroitement lié au concept de "zone proximale de développement" développée par Vygotski. Jérôme Bruner a distingué six fonctions de l'étayage : l'enrôlement qui permet de susciter l'adhésion de l'apprenant aux exigences de la tâche ; la réduction des degrés de liberté qui consiste à simplifier la tâche de l'apprenant en réduisant la difficulté du processus de résolution ; le maintien de l'orientation qui permet de conserver auprès de l'apprenant le but initialement fixé afin de l'aider à ne pas changer d'objectif durant la résolution de la tâche ; la signalisation des caractéristiques dominantes qui permet de faire prendre conscience à l'apprenant des écarts qui existent entre ce qu'il réalise et ce qu'il voudrait réaliser ; le contrôle de la frustration permettant de maintenir l'intérêt et la motivation de l'apprenant ; la démonstration ou la présentation des modèles de solution pour que l'apprenant tente de l'imiter en retour sous la forme appropriée (Bruner, 1983).

connaissances donnent une place importante aux acquis antérieurs, aux concepts scientifiques enseignés et aux processus de leurs conceptualisations au cours du processus d'apprentissage.

### **3.2. Implications et orientation de l'apprentissage en contexte scolaire dans le cadre de cette étude**

La vision didactique de l'apprentissage scolaire que nous venons de développer s'inscrit bien avec les recommandations issues des réformes curriculaires de chimie dans l'enseignement secondaire général camerounais. Parmi ces recommandations, nous avons principalement celle selon laquelle l'enseignant doit faciliter la construction des concepts fondamentaux de chimie chez les élèves, afin que ces derniers développent une culture scientifique et les compétences nécessaires pour résoudre les situations conceptuellement problématiques qu'ils rencontrent dans ce domaine d'étude ou dans la vie quotidienne. Ladite recommandation est aussi en droite ligne avec celles issues de plusieurs recherches visant à comprendre davantage le processus d'apprentissage en centrant plus leurs efforts dans une approche socioconstructiviste que béhavioriste de l'apprentissage scolaire ayant permis de redéfinir le rôle de chaque acteur impliqué dans le processus. Ces recherches préconisent que le travail de l'enseignant ne se limite plus à délivrer des informations, mais qu'il veille également sur la qualité du savoir acquis. Pour ce faire, il doit donc créer les conditions pour que le sujet apprenant puisse interagir avec les savoirs, les transformer en connaissances qu'il va ensuite les mobiliser dans les situations non-didactiques (Alexandre, 2017 ; Jonnaert & Vander Borgh, 2008 ; Raby & Viola, 2016 ; St-Yves, 1982 ; Tardif, 1997). L'enseignant doit également tenir compte que lors de l'interaction entre le savoir à acquérir et les connaissances déjà présentes en mémoire à long terme de l'apprenant, seules les connaissances préconçues (conceptions alternatives) déterminent non seulement ce qu'il peut apprendre, mais également ce qu'il apprendra effectivement et comment les nouvelles connaissances seront apprises (Astolfi et al., 2008 ; Tardif, 1997). Un phénomène qui complexifie davantage le processus d'apprentissage qui, dans ce cas, nécessite plutôt que l'enseignant amène l'apprenant à opérer un changement conceptuel. C'est le cas de l'apprentissage du concept de concentration chimique comme nous l'avons montré au niveau de la problématique.

C'est la raison pour laquelle, dans le cadre de la présente étude, l'apprentissage est considéré comme un processus de changement conceptuel au cours duquel, avec l'aide d'un

enseignant et de ses pairs, l'apprenant améliore et développe de nouvelles compréhensions conceptuelles pour mieux interpréter et décrire les phénomènes scientifiques (plus particulièrement les phénomènes chimiques). Pour cela, il sera question d'examiner dans la partie suivante à quoi consiste un changement conceptuel dans l'apprentissage des sciences.

#### **4. L'apprentissage scientifique en tant que processus de changement conceptuel**

Notre recherche s'inscrit globalement dans le cadre théorique du changement conceptuel, et plus particulièrement, celui du changement conceptuel suivant la perspective neurodidactique des sciences qui est le modèle de prévalence conceptuelle. Avant d'entrer dans le vif du sujet, nous allons d'abord faire un bref rappel de l'origine du concept de « conception » en didactique.

##### **4.1. Origine et évolution du concept de conception en didactique**

Les premières recherches sur la notion de conception remontent de l'époque de Bachelard (1967) avec l'idée d'obstacle épistémologique. Pour lui, c'est dans l'acte même de connaître qu'apparaissent, par une sorte de nécessité fonctionnelle, des lenteurs et des troubles. D'où la nécessité de déceler les causes de stagnation, de régression et d'inertie qu'il a appelé obstacles épistémologiques. À son époque, il questionnait déjà en ces termes le fait qu'en éducation, la notion d'obstacle soit méconnue :

*J'ai souvent été frappé du fait que les professeurs de sciences, ne comprennent pas qu'on ne comprenne pas. ... Ils pensent qu'on peut faire comprendre une démonstration en la répétant point pour point. Ils n'ont pas réfléchi au fait que l'adolescent arrive dans la classe de physique avec des connaissances empiriques déjà constituées. Il s'agit alors, non pas d'acquérir une culture expérimentale, mais bien de changer de culture expérimentale. (Bachelard, 1967, pp. 21-22)*

Pour Gaston Bachelard, les professeurs de sciences imaginent que l'esprit commence comme une leçon. Or, l'apprenant arrive dans la salle de classe avec les idées préconçues sur la plupart des phénomènes qui sont à l'étude. Ainsi, la formation à l'esprit scientifique doit consister à renverser les obstacles liés à ces idées préconçues par la vie quotidienne, plutôt qu'aux développements et aux démonstrations des formules que l'apprenant doit mémoriser par cœur.

Les chercheurs en didactique des sciences intègrent dans leurs travaux la notion de « conception des élèves » à partir des années 1970. Mais c'est entre les années 1980-1990

que la notion de « conception » va occuper une place importante dans la didactique des sciences. Durant cette période, la plupart des études menées sur les conceptions des élèves dans la zone francophone étaient centrées sur les obstacles d'apprentissage. Plusieurs de ces recherches ont orienté leur étude sur les meilleures manières d'étudier ces obstacles (Astolfi & Develay, 1989). Après les années 90, plusieurs autres chercheurs vont faire du franchissement de ces obstacles, des vrais objectifs d'apprentissage (Astolfi, 1992 ; Astolfi & Brigitte, 1993). Par rapport à ce sujet, Christian Orange et Denise Orange Ravachol font le constat selon lequel c'est en termes de dépassement d'obstacles que les apprentissages des élèves et l'élaboration des dispositifs didactiques sont désormais pensés (Orange & Orange Ravachol, 2013). Simultanément, dans la zone anglo-saxonne un autre axe de recherche centré sur le « changement conceptuel » se développait. Pour cette tendance, l'apprentissage est considéré comme le passage des conceptions alternatives aux conceptions plus scientifiques (Orange & Orange Ravachol, 2013).

Mais depuis un certain temps, les recherches sur l'émergence et l'évolution des conceptions alternatives vers des conceptions scientifiquement acceptables dans l'apprentissage des sciences, jadis considéré comme une préoccupation de la communauté de la recherche anglophone, sont devenues, au fil des années, une préoccupation d'ordre mondial (Potvin et al., 2020a). C'est pourquoi, à la suite des pionniers de la recherche sur le changement conceptuel tels que : George Posner, Kenneth Strike, Peter Hewson, Joseph Nussbaum et Shimshon Novick...; plusieurs chercheurs contemporains comme : Andrea diSessa, David Treagust, Reinders Duit, André Giordan, Patrice Potvin, Stève Masson, Stella Vosniadou, Michel Bélanger, Chin-Chung Tsai et Michelene Chi, pour ne citer que ceux-ci, ont fait émerger des programmes de recherche qui ont significativement contribué à l'avancement de connaissances dans ce domaine d'étude comme nous allons le montrer plus tard dans ce chapitre. Ainsi, l'idée générale de changement conceptuel, même si elle a pris diverses formes et dénominations, est loin d'être nouvelle et loin d'être une exclusivité du monde occidental. De nos jours, le changement conceptuel est reconnu comme un aspect fondamental de l'apprentissage des sciences et comme un processus clé de l'apprentissage dans d'autres domaines, puisqu'il est le processus par lequel la construction des modèles mentaux s'opère (Limón & Mason, 2002).

Les études dans le domaine de la recherche sur le changement conceptuel vont, de ce fait, atteindre leur vitesse de croisière au milieu des années 1990 (Potvin et al., 2020a). Et comme en témoignent les études de Duit (2009) ; Amin et al. (2014) et Potvin et al. (2020b),

la littérature sur les conceptions des apprenants et leurs changements est vaste. Plusieurs recherches issues de cette littérature prônent de ne pas négliger les aspects positifs de la contribution des conceptions des élèves dans le processus d'apprentissage (Amin et al., 2014).

#### **4.2. Nécessité de tenir compte des conceptions dans le processus d'enseignement-apprentissage**

Cormier (2014) a fait mention d'une étude qui montre la nécessité de prendre en compte les conceptions alternatives dans le processus d'apprentissage dans le cadre de ses travaux de thèse portant sur l'étude des conceptions alternatives et des processus de raisonnement des étudiants de chimie du niveau collégial sur la molécule, la polarité et les phénomènes macroscopiques. Il s'agit d'une méta-analyse menée par Richard Hake en 1998 qui regroupe des données pour près de 6 500 étudiants d'écoles secondaires, de collèges et d'universités américains, où il compare les résultats des examens traditionnels à ceux d'évaluations conceptuelles en physique. Les résultats obtenus par ce dernier montrent que les étudiants ayant suivi un enseignement conceptuel (qui prend en compte les conceptions des étudiants) avaient de meilleurs résultats aux examens conceptuels, mais aussi aux examens traditionnels, que ceux qui n'avaient eu qu'un enseignement traditionnel. Plus récemment, Ambomo (2022) a mené une autre étude similaire où elle évalue, à son tour, l'impact d'une prise en compte des conceptions alternatives des apprenants lorsqu'ils conceptualisent le phénomène de conduction électrique dans une pile électrochimique. Dans cette étude, elle a comparé les performances de 205 apprenants camerounais des niveaux secondaire et universitaire repartis en deux groupes. Un groupe ayant suivi un enseignement conceptuel prenant en compte les conceptions alternatives des apprenants et un autre groupe ayant suivi, à son tour, un enseignement classique ne prenant pas en compte les conceptions alternatives des apprenants. Les résultats obtenus dans cette recherche montrent que les apprenants ayant suivi un enseignement conceptuel prenant en compte leurs conceptions alternatives performant mieux lorsqu'ils répondent aux questions sur le phénomène de conduction électrique dans une pile électrochimique comparativement à ceux qui ont suivi un enseignement classique ne prenant pas en compte leurs conceptions alternatives. À travers ces résultats, la chercheuse conclut que la prise en compte des conceptions alternatives des apprenants dans un processus d'enseignement-apprentissage permet une meilleure conceptualisation, par ces derniers, du phénomène de conduction électrique dans une pile électrochimique.



Toutes ces études appuient donc l'idée selon laquelle un enseignement tourné vers le changement conceptuel est plus efficace qu'un enseignement classique pour réaliser un apprentissage en sciences. Ainsi, pour Astolfi et al., (2008) reprise par Cormier (2014), la prise en compte des conceptions alternatives en didactique est la nécessité qu'après avoir mis en lumière les conceptions alternatives des étudiants, on les confronte aux objets d'enseignement pour parvenir au changement conceptuel. Par la suite, des dispositifs didactiques peuvent être mis en place pour favoriser le changement conceptuel, et, ainsi, s'assurer d'un apprentissage réussi. Duit et Treagust (2003) ; Treagust et Duit (2009); Kumi-Manu (2021) renchérissent en considérant l'apprentissage des sciences d'un point de vue constructiviste comme un changement conceptuel dans lequel les apprenants jouent un rôle actif dans la réorganisation de leurs connaissances. À ce sujet, Kumi-Manu (2021) pense que l'apprentissage devrait entraîner une transformation de la pensée et de l'attitude de l'élève. Car l'élève n'est pas conscient que certaines connaissances qu'il a, sont erronées ; ses conceptions alternatives sont profondément enracinées dans sa pensée et sont parfois très imperméables à l'enseignement et interfèrent avec sa capacité de comprendre correctement de nouvelles informations. Pour ce faire, un changement conceptuel doit donc se produire pour que l'apprentissage ait lieu. De cette façon, le changement conceptuel désigne les parcours d'apprentissage depuis les conceptions alternatives des élèves jusqu'à l'acquisition des concepts scientifiques à apprendre. Les structures conceptuelles préexistantes des apprenants doivent, à cet effet, être fondamentalement restructurées, afin de permettre la compréhension des connaissances visées, c'est-à-dire l'acquisition de concepts scientifiques (Duit & Treagust, 2003 ; Treagust & Duit, 2009). Cela requiert de la part de l'apprenant un raisonnement basé sur la logique.

#### **4.3. Nécessité de tenir compte des types de raisonnement dans le processus d'enseignement-apprentissage**

Dans le cadre de la didactique de la chimie, Caroline Cormier se base sur les travaux de la psychologie cognitive (Tardif, 1997) pour démontrer que les idées et les concepts sont reconstruits dans la tête des personnes qui font le raisonnement, et du fait que l'accès à leurs modèles mentaux est impossible de l'extérieur, ils sont tacites (inexprimés). De ce fait, la sollicitation de la réponse à une question, nécessitant la mobilisation desdits modèles mentaux (idées ou concepts), déclenche immédiatement le mécanisme du raisonnement qui engendre une réponse qui, à son tour, est manifesté (Cormier, 2014). Mais puisque le raisonnement (savoir réfléchir) est la capacité d'un individu à faire appel à sa raison pour

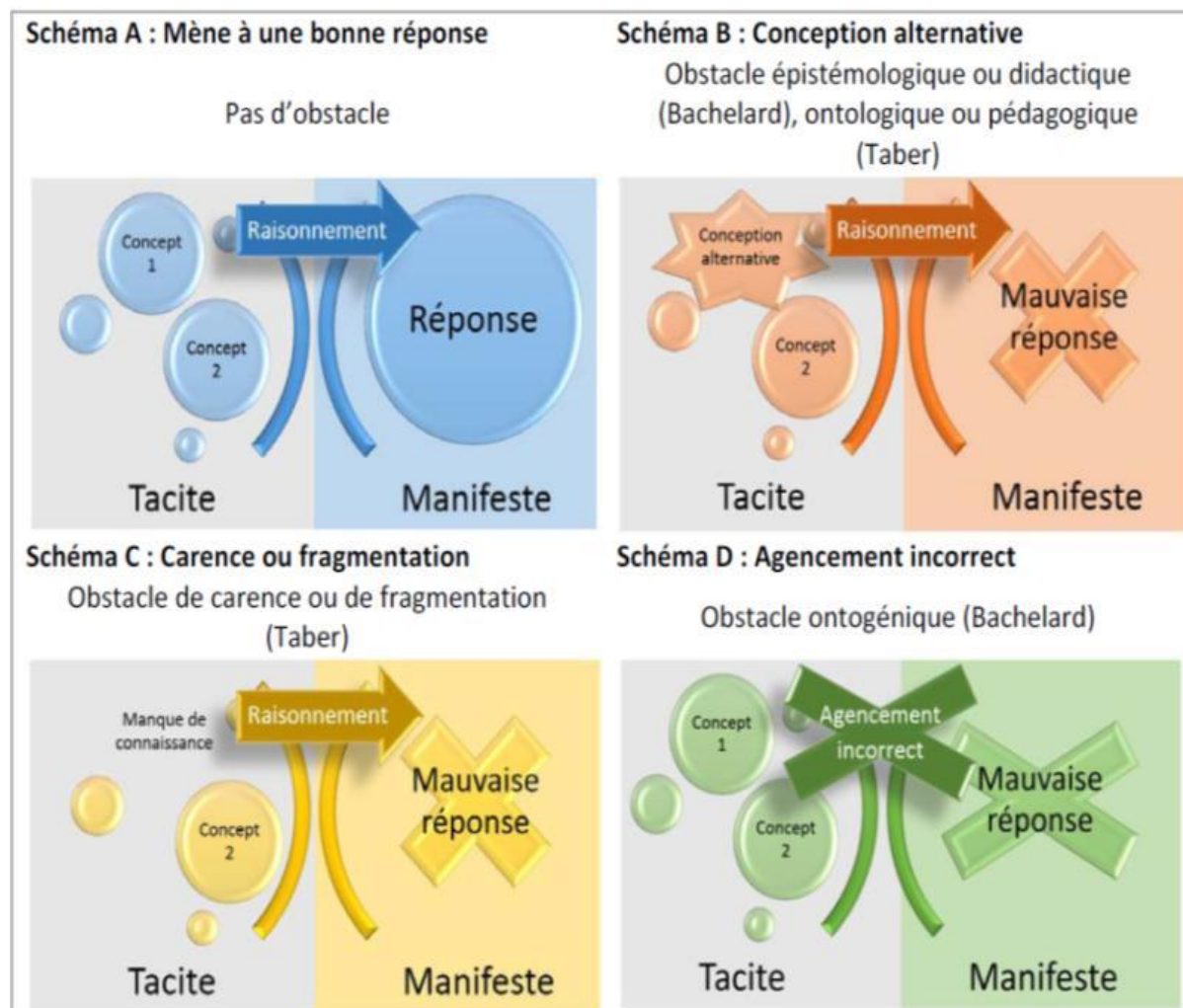
dominer ses réponses trop rapides et impulsives (intuitions, croyances et émotions) (Houdé, 2014b), la question qui se pose est celle de savoir quel type de lien le raisonnement entretient avec les conceptions alternatives ?

Une réponse à cette question vient une fois de plus de l'étude de Cormier (2014) dans laquelle elle résume en quatre catégories (voir figure 19) la façon dont les modèles mentaux tacites mènent à une réponse manifeste (modèles mentaux  $\longrightarrow$  réponse). Dans sa catégorisation, Caroline Cormier prend en compte les différentes typologies d'obstacles répertoriées en éducation, plus particulièrement dans l'apprentissage des sciences, et qui prédisposent les apprenants à formuler les mauvaises réponses. Parmi les typologies d'obstacles, nous avons :

- les obstacles épistémologiques, les obstacles ontogéniques et les obstacles didactiques catégorisés par Gaston Bachelard dans l'apprentissage des sciences (Bachelard, 1967). Les obstacles ontogéniques sont attribuables au niveau de développement cognitif des apprenants ; les obstacles épistémologiques attribuables, à leur tour, à la nature et à l'évolution historique même des concepts scientifiques ; et enfin les obstacles didactiques qui trouvent leur source dans l'enseignement lui-même ;
- les obstacles liés à une carence conceptuelle, les obstacles de fragmentation, les obstacles ontologiques et les obstacles pédagogiques identifiés en 2001 par Keith Taber dans l'apprentissage de la chimie. Les obstacles liés à une carence conceptuelle et les obstacles de fragmentation sont liés aux lacunes ou à un manque d'organisation dans les connaissances des apprenants. Ils sont souvent moins problématiques et peuvent être corrigés très facilement par des interventions didactiques simples ou moins lourdes. Les obstacles ontologiques proviennent, à leur tour, de l'incompatibilité des objets d'enseignement avec les conceptions des apprenants du monde. Les obstacles pédagogiques, équivalents aux obstacles didactiques de Gaston Bachelard, trouvent également leur origine dans l'enseignement, c'est-à-dire lorsque les objets d'enseignement présentés aux apprenants entrent en contradiction avec l'apprentissage effectué précédemment par exemple (Cormier, 2014).

**Figure 19**

*Schématisation des processus des modèles mentaux tacites qui conduisent à une réponse manifeste (Cormier, 2014, p. 56)*



Caroline Cormier explique les modélisations de ces différents mécanismes cognitifs que les apprenants mettent en scène lorsqu'ils sont appelés à fournir des réponses (mauvaises ou bonnes) à des questions comme suit :

- dans la mémoire de l'apprenant, le mécanisme de raisonnement qui conduit à une bonne réponse (schéma A) s'appuie sur un modèle mental construit qui est cohérent avec la théorie scientifiquement acceptée. C'est la raison pour laquelle ce type de raisonnement conduit à une réponse correcte, puisqu'il est fondé sur la logique. Par conséquent, malgré que deux concepts coexistent dans le cerveau de l'apprenant qui donne une bonne réponse, il parvient tout de même à les coordonner de façon appropriée dans un processus de raisonnement ;

- dans le processus de raisonnement qui conduit plutôt à une mauvaise réponse, plusieurs cas de figure se présentent. Premièrement, la présence d'une conception alternative dans les modèles mentaux de l'apprenant (schéma B). Bien que cette conception alternative ne soit pas en elle-même la réponse à la question, le simple fait que le raisonnement de l'apprenant s'appuie sur elle, peut, malgré tout, conduire à la formulation d'une mauvaise réponse même si ce raisonnement s'avère logique. Deuxièmement, la mauvaise réponse peut aussi provenir du fait qu'un apprenant manifeste une carence ou une fragmentation d'outil conceptuel nécessaire pour mener un raisonnement logique afin de répondre à une question (schéma C). Cette situation peut se justifier par le fait que soient ces outils conceptuels ne lui ont jamais été enseignés, soit il ne les a en réalité jamais appris ou conceptualisés. Dans ce cas précis, Cormier (2014) reprenant Taber (2001) suggère de surmonter au préalable cet obstacle avant que tout autre apprentissage dans le domaine soit entrepris ; de peur que le nouveau matériel d'apprentissage soit incompris s'il ne peut pas s'attacher sur des connaissances antérieures existantes. Toujours dans ce cas du schéma C, la mauvaise réponse peut plutôt provenir des connaissances présentes dans la mémoire de l'apprenant en morceaux et dont il ne perçoit pas leur utilité ou la relation avec la situation à laquelle il fait face. Mais du fait de l'impossibilité d'accéder de l'extérieur aux modèles mentaux tacites et des difficultés qui entourent le sondage des connaissances en fragments dans la mémoire de l'apprenant (Bloch, et al., 1999 ; Cormier, 2014 ; Legendre, 2000), notre recherche se limitera aux raisonnements basés sur les carences ou manques de connaissances. Enfin, une mauvaise formulation de la réponse à une question par l'apprenant peut provenir d'une inadéquation entre les exigences conceptuelles d'un contenu enseigné et le degré de compétence de raisonnement des élèves à qui ce contenu est enseigné (schéma D). C'est-à-dire dans le raisonnement les concepts appropriés sont invoqués pour construire la réponse, mais la façon dont ils sont mis en relation les uns avec les autres mène à la mauvaise réponse. C'est la raison pour laquelle Cormier parle de l'agencement incorrect de concepts dans ce cas (Cormier, 2014).

Néanmoins, il est aussi important de mentionner qu'en-dehors de ces cas de figure que nous venons de présenter, certaines réponses incorrectes des apprenants peuvent aussi provenir d'une combinaison simultanée entre les conceptions alternatives et les connaissances conceptuelles parcellaires dans le raisonnement (Cormier, 2014). D'autres

réponses fausses, plus particulièrement dans la résolution de tâches en chimie, peuvent également provenir du raisonnement basé sur les règles (*rules-based reasoning*), le raisonnement basé sur l'expérience de cas (*case-based reasoning*), le raisonnement basé sur l'application de modèles (*model-based reasoning*) et le raisonnement basé sur les symboles (*symbol-based reasoning*) (Christian & Talanquer, 2012 ; Ferguson & Bodner, 2008<sup>19</sup> ; Kraft et al., 2010<sup>20</sup> cités dans Cormier, 2014).

Le raisonnement basé sur les règles est fastidieux, puisqu'il nécessite l'utilisation d'un ensemble des règles correspondant chacune à une petite portion de connaissance, dont il faut coordonner méticuleusement pour aboutir à la réponse exacte. Contrairement aux raisonnements basés sur des heuristiques que nous avons présentés au niveau de notre problématique, le raisonnement basé sur les règles est plutôt plus coûteux cognitivement et l'oubli d'une seule règle conduit inévitablement à une mauvaise réponse. Le raisonnement basé sur l'expérience de cas est appliqué lorsque les caractéristiques familières à la tâche sont reconnues par la personne qui fait le raisonnement. À l'opposé du raisonnement basé sur les règles, le raisonnement basé sur l'expérience des cas est moins coûteux cognitivement puisqu'il s'apparente aux raisonnements basés sur les heuristiques. La personne ou l'apprenant qui mène ce type de raisonnement pour résoudre un problème adapte les anciennes solutions à de nouveaux problèmes ou utilise des expériences passées pour créer ou analyser une solution à un nouveau problème. Certes, il mène rapidement à la solution (réponse juste), mais il est également plus prompt à générer des mauvaises réponses si l'on n'est pas vigilant et attentif, étant donné que le caractère familial est toujours trompeur dans la majorité des cas. Le raisonnement basé sur les modèles est le type de raisonnement cognitif le plus sollicité par les apprenants en chimie pour résoudre les problèmes. Il se base à la fois sur des connaissances détaillées permettant d'expliquer les phénomènes et un raisonnement raccourci permettant de les prédire. Mais, du fait de l'omniprésence des conceptions alternatives ou d'un manque de connaissances suffisantes sur le modèle qu'on veut employer, les apprenants peuvent combiner dans leur processus de raisonnement des idées scientifiquement acceptables et les conceptions alternatives. Ce qui conduira

---

<sup>19</sup> Ferguson, R. L., & Bodner, G. M. (2008). Making sense of arrow-pushing formalism among chemistry majors enrolled in organic chemistry. *Chemistry Education Research and Practice*, 9, 102-113.

<sup>20</sup> Kraft, A., Strickland, A. M., & Bhattacharyya, G. (2010). Reasonable reasoning: Multi-variate problem-solving in organic chemistry. *Chemistry Education Research and Practice*, 11, 281-292.

inéluçtablement à une mauvaise réponse. Enfin, le raisonnement basé sur les symboles, qui est centré sur la manipulation du symbolisme chimique par les apprenants qui ne comprennent pas la raison des processus chimiques, mais se fient uniquement aux caractéristiques symboliques superficielles des situations à résoudre. C'est une approche de raisonnement simpliste et peu efficace qui traduit une faible intégration des contenus ou une compréhension conceptuelle moindre chez l'apprenant qui l'utilise dans la résolution d'une tâche cognitive (Cormier, 2014).

Enfin, les schémas de la figure 19 nous montrent également que même si plusieurs chercheurs en didactiques s'entendent pour dire que la première étape pour favoriser le changement conceptuel passe par l'identification préalable des erreurs ou difficultés liées aux conceptions alternatives des apprenants, ce ne sont pas alors toutes les mauvaises réponses qui proviennent des conceptions alternatives (Cormier, 2014). Dans bon nombre de cas, certaines de ces mauvaises réponses peuvent provenir d'un manque de connaissances ou d'un mauvais agencement conceptuel. C'est pourquoi l'identification et la catégorisation typologique des mécanismes de raisonnement qui conduisent à la réponse que propose l'apprenant face à une situation sont importantes. Ainsi, pour qu'une remédiation soit efficace, Taber (2001) et Cormier (2014) suggèrent de remédier différemment aux difficultés liées aux conceptions alternatives et aux difficultés liées aux carences conceptuelles ou aux mauvais agencements conceptuels ou aux fragmentations conceptuelles. Car la remédiation des difficultés liées aux carences, aux fragmentations et aux mauvaises coordinations conceptuelles nécessite souvent une intervention pédagogique moins lourde à mener en classe. Par exemple, Cormier (2014) pense que si les difficultés identifiées sont liées spécifiquement aux carences conceptuelles, cela traduit une absence de l'apprentissage. Par conséquent, leur remédiation ne doit pas viser un changement conceptuel, car selon la chercheuse, il semble n'y avoir pas des conceptions alternatives présentes dans la mémoire de l'apprenant, mais plutôt l'absence d'une connaissance conceptuelle. Par contre, la remédiation des difficultés liées aux conceptions alternatives nécessite plutôt le développement des dispositifs didactiques qui doivent favoriser le changement conceptuel (Cormier, 2014).

À cet égard, de nombreux modèles pédagogiques ou cognitifs qui ont, d'une part, pour but de rendre compte de ce que peuvent signifier une conception et un changement conceptuel ont été élaborés par les chercheurs en éducation scientifique et en didactique des sciences (Potvin, 2018 ; Potvin et al., 2020a). D'autre part, ces modèles prescrivent aussi

des actions à mener qui pourront faciliter une meilleure conceptualisation des notions scientifiques par les élèves. Dans le cadre de cette thèse, vu la multitude des modèles du changement conceptuel qui sont proposés par les chercheurs (Potvin et al., 2020a), seuls les modèles les plus connus et les modèles sur lesquels notre étude s'appuie seront présentés.

#### **4.4. Quelques modèles de changement conceptuel**

Pour appréhender le concept de changement conceptuel, nous allons préciser sa définition. En didactique, une conception représente les systèmes de connaissances qu'un individu mobilise lorsqu'il est face à une question ou à une thématique ; qu'elle ait fait l'objet d'un enseignement ou pas. Son changement vise soit à sa modification, soit à son évolution vers une conception plus experte (Bêty, 2010). De plus, comme nous l'avons montré au niveau de notre problématique, une conception peut également être une représentation mentale ou une idée qu'une personne a vis-à-vis du fonctionnement des choses et qui sous-tend sa compréhension du monde. Suivant cette perspective, son changement peut consister, comme nous allons le montrer par la suite, à une sorte de course entre les conceptions rivales et en fonction de l'utilité cognitive perçue de chacune des idées rivales, si la valeur prédictive ou explicative d'une conception est soudainement reconnue dans un contexte donné par celui qui le possède, son statut connaîtra pour ce contexte un gain de valeur (Potvin, 2018). Face à ce sujet, Keith Taber fait un constat selon lequel le changement conceptuel n'est donc pas seulement influencé par les conceptions que les apprenants ont déjà, mais aussi par la nature et le statut de ces conceptions (Taber, 2019). Il suggère à cet effet, d'utiliser le terme « changement conceptuel » pour désigner tout type de changement majeur dans les conceptions ou dans la compréhension d'une personne qui lui permet de passer d'une conception alternative à une conception scientifiquement acceptable.

Du fait de la complexité des mécanismes et des conditions qui régissent le fonctionnement du phénomène de changement conceptuel, plusieurs influences idéologiques ont marqué le développement des modèles de changement conceptuel. Parmi ces influences idéologiques, nous avons : la dissonance cognitive de Festinger<sup>21</sup> (1957) ; les

---

<sup>21</sup> La dissonance cognitive est une théorie cognitive établie par le psychosociologue américain Léon Festinger (1919 - 1989) dans les années 1950 qui explique la tension interne propre au système de pensées, de croyances, des émotions et des attitudes cognitives d'une personne lorsque plusieurs d'entre elles entrent en contradiction, les unes avec les autres.

obstacles épistémologiques de Bachelard<sup>22</sup> (1967) ; l'épistémologie ou le structuralisme génétique de Piaget<sup>23</sup> (1968, 2005) ; les révolutions scientifiques de Kuhn<sup>24</sup> (1972) et l'écologie conceptuelle de Toulmin<sup>25</sup> (1972).

#### 4.4.1. Modèles de remplacement conceptuel

Ces modèles se sont fondés sur les concepts philosophiques et psychologiques tels que l'accommodation, les révolutions scientifiques et la dissonance cognitive (Potvin, 2018). Par conséquent, l'idée fondamentale qui régit le fonctionnement de ces modèles est celle selon laquelle l'évolution des conceptions alternatives des apprenants vers des conceptions scientifiques nécessite, au préalable, leurs mises en échec ou leurs déconstructions. Autrement dit, pour qu'un changement de conception ou de compréhension ait lieu, il faut briser l'état d'équilibre ou de confort conceptuel satisfaisant dans lequel se trouvent les apprenants au départ et y installer plutôt une insatisfaction (Potvin, 2018) susceptible de créer une tension inconfortable (Festinger, 1957), une anomalie (Kuhn, 1972) ou un déséquilibre (Piaget, 2005) dans leurs systèmes de pensées. Cette tension inconfortable (ou cette anomalie ou encore ce déséquilibre provoqué) que les chercheurs dans le domaine éducatif appellent « conflit cognitif », est définie en didactique des sciences comme : « *l'état cognitif dans lequel s'inscrit une personne lorsqu'elle se trouve incapable de réconcilier logiquement une conception à laquelle elle accorde du crédit avec des informations, des observations ou des propositions qui s'imposent à elle* » (Potvin, 2018, p. 275). Sur le plan pratique, pour provoquer de tels conflits dans le système de pensée de l'apprenant, les

---

<sup>22</sup> L'obstacle épistémologique est un concept inventé par le philosophe français des sciences Gaston Bachelard (1884 - 1962) en 1938 dans son livre intitulé « La formation de l'esprit scientifique » qui désigne l'idée première, la première expérience ou, plus exactement, l'observation première qui vient se placer entre le désir de connaître du scientifique et l'objet qu'il étudie.

<sup>23</sup> L'épistémologie génétique est une théorie de la connaissance développée par le psychologue suisse Jean Piaget (1896 - 1980) dans les années 1970 qui analyse les mécanismes qui sous-tendent l'accroissement des connaissances et explique l'acquisition de la connaissance par l'enfant comme un processus constructif ou structural (Piaget, 2005).

<sup>24</sup> Les révolutions scientifiques sont une thèse défendue par le philosophe américain des sciences Thomas Kuhn (1922 - 1996) dans son livre intitulé « La Structure des révolutions scientifiques » paru en 1962 qui explique l'évolution des idées scientifiques comme un processus au cours de laquelle, lorsqu'une anomalie se manifeste, une crise s'établit parmi les scientifiques et perdure jusqu'à l'émergence de nouvelles idées nécessairement « révolutionnaires », pour résoudre le problème qui aboutira à l'adoption d'un nouveau paradigme.

<sup>25</sup> L'écologie conceptuelle est un concept développé par le philosophe britannique Stephen Toulmin (1922 - 2009) en 1958 qui désigne l'ensemble des concepts ou idées possédées par l'individu à l'intérieur duquel sa conception sur un phénomène dans un contexte donné est vue comme une entité atomique.



modèles de remplacement recommandent d'exposer l'apprenant à des informations, des propositions ou des observations crédibles qui entreront en contradiction avec son système de pensée préexistant. Ces conflits vont induire, à leur tour, des rééquilibrations<sup>26</sup>, des accommodations<sup>27</sup>, des révolutions de pensées ou de réduction de dissonance qui vont conduire à des conceptions proche des modèles et théories reconnus par la communauté scientifique (Potvin, 2018). Par la suite, dès que l'effet escompté est obtenu, les modèles de remplacement des conceptions alternatives suggèrent de présenter oralement aux élèves, les concepts scientifiques qu'on veut leur faire acquérir. Potvin (2018) résume ces modèles en deux temps qui sont: le conflit suivi de la résolution.

Parmi les modèles de changement conceptuel basés sur le remplacement des conceptions des élèves, le plus connus et parfois considéré comme le modèle fondateur du champ de recherche sur le changement conceptuel est celui de Posner et al. (1982). Ces auteurs envisagent, eux aussi, le changement conceptuel comme une assimilation<sup>28</sup> et une accommodation ou remplacement des conceptions où, ce dernier ne se réaliserait que par un conflit cognitif se produisant lorsque les apprenants lisent des textes réfutationnels, assistent à des démonstrations surprenantes ou réalisent des expérimentations contre-intuitives<sup>29</sup> (Posner et al., 1982). Lors de la mise en œuvre de ce modèle, les contenus doivent être planifiés de telles sortes qu'on obtienne une confrontation avec les conceptions initiales des élèves. Pour cela, les auteurs de ce modèle recommandent de proposer des situations-problèmes représentées sous différents modes (expérience, schéma, symboles, etc.) qui font ressortir des anomalies, c'est-à-dire des cas où le modèle initial s'avère insuffisant, en utilisant un vocabulaire adéquat et intelligible. Par la suite, procéder à l'institutionnalisation du savoir scientifique plausible et féconde qu'on veut faire acquérir aux apprenants.

Toutefois, plusieurs recherches (Chandrasegaran, et al., 2007; Limón & Mason, 2002 ; Potvin, 2018 ; Treagust & Duit, 2009) ont démontré que les conceptions alternatives des élèves ne succombent pas si facilement qu'on pourrait le penser, mais elles sont d'autant plus ancrées chez ces derniers et résistent au changement souhaité suite à un enseignement basé sur la simple création des conflits cognitifs ayant pour but de remplacer les conceptions alternatives. Ce phénomène de résistance conceptuelle au changement n'est pas, pour autant,

---

<sup>26</sup> Le fait de redonner un nouvel équilibre.

<sup>27</sup> Moments où l'élève doit remplacer ou réorganiser ses conceptions.

<sup>28</sup> Utilisation de concepts déjà construits pour appréhender de nouveaux phénomènes.

<sup>29</sup> Expérience qui produit un résultat inverse ou très différent de celui auquel on s'attend intuitivement, avant que l'expérience ne soit mise en action.

seulement spécifique aux élèves. Il se manifeste aussi très souvent même chez des spécialistes de recherche des domaines disciplinaires qui, dans la plupart des cas, sont parfois très réticents aux idées révolutionnaires qui impliquent un changement de paradigme. Un cas illustratif en chimie est celui de la résistance de certains chimistes comme Priestley<sup>30</sup> à abandonner la doctrine du phlogistique<sup>31</sup> au profit de celle de la conservation de la matière élaborée par Lavoisier<sup>32</sup> qui rend mieux compte des phénomènes microscopiques qui sous-tendent les réactions de combustion (Taber, 2019).

D'un point de vue didactique, ces résistances peuvent se justifier d'une part, par le fait que l'objectif visé par les conflits cognitifs n'est pas toujours atteint. Puisque selon Patrice Potvin et d'autres chercheurs du domaine, les élèves ont beaucoup d'affections pour leurs conceptions et, par conséquent, ils tendent à éviter les conflits qui visent à les contrarier, en réduisant au maximum possible, la portée de ces conflits à travers toutes sortes de mécanismes psychologiques qui conduiront aux objectifs autres que celui poursuivi par lesdits conflits. D'autre part, ces conceptions n'existent pas isolément, mais elles font généralement partie des réseaux conceptuels complexes qui se renforcent mutuellement (Potvin, 2018 ; Taber, 2019) et que Toulmin (1972), à son époque, a appelé : l'écologie conceptuelle. Ce qui ne sert à rien d'engager une bataille ponctuelle pour remplacer les conceptions alternatives. Mais il faut plutôt élaborer des véritables programmes réfutationnels pour les faire évoluer vers des conceptions scientifiquement acceptables. Ces limites des modèles de remplacement des conceptions ont servi de base à d'autres chercheurs pour penser et élaborer d'autres modèles de changement conceptuel, malgré le fait qu'ils restent les plus populaires dans les pratiques enseignantes jusqu'à ce jour.

---

<sup>30</sup> Joseph Priestley (1733-1804) était un chimiste, physicien et philosophe Anglais (Français par décret) qui a, pour la première fois, isolé l'oxygène en 1774 et l'a nommé « air déphlogistiqué » en tant que fervent partisan de la théorie phlogistique (Bensaude-Vincent & Stengers, 1993).

<sup>31</sup> La théorie phlogistique est une théorie chimique révolue conçue par Johann Joachim Becher (1635-1682) à la fin du XVII<sup>e</sup> siècle et développée ensuite par Georg Ernst Stahl (1660-1734) pour expliquer la combustion en postulant l'existence d'un « élément-flamme », présent au sein des corps combustibles (Bensaude-Vincent & Stengers, 1993).

<sup>32</sup> Antoine Laurent Lavoisier (1743-1794) était un chimiste français considéré comme le père de la chimie moderne. En 1772, il pratique des expériences sur la combustion d'échantillons de phosphore et de soufre en présence de l'air et découvre que les produits obtenus pesaient plus que les réactifs de départ. Il explique cette augmentation de masse par la présence, dans les produits formés, de l'oxygène provenant de l'air. Les résultats de ces expériences ont conduit à l'élaboration, par Lavoisier, de la loi de conservation de la matière à savoir : la masse totale des réactifs et la masse totale des produits restent identiques du début jusqu'à la fin d'une réaction chimique (Bensaude-Vincent & Stengers, 1993).

#### 4.4.2. Modèles de transformation conceptuelle

Contrairement aux modèles de remplacement de concepts, certains modèles de changement conceptuel qui ont vu le jour à partir de la première moitié des années 1990 optent plutôt pour une approche microscopique. Ils considèrent, à leur tour, les conceptions des apprenants comme des structures élémentaires complexes dont la réforme ne se fait que graduellement avec une multitude d'états intermédiaires possibles (Bélanger, 2008). Suivant cette perspective, les conceptions alternatives des apprenants n'ont tout simplement pas besoin d'être remplacées, mais elles peuvent être suffisamment développées ou réorganisées pour l'usage qui a été prévu pour elles (Potvin, 2018). À ce sujet, Patrice Potvin écrit :

*Dans cette perspective, un changement conceptuel serait plutôt considéré comme une transformation des structures cognitives ayant été déséquilibrées par les interactions de l'apprenant avec le milieu dans lequel il se trouve. Cette idée générale de transformation, parfois appelée aussi restructuration ou reconfiguration, suggère qu'il faille d'abord procéder à une sorte de déconstructions totale ou partielle du déjà-là, et sous-entend non seulement que certaines parties ou certains aspects des conceptions initiales devront être disposés ou liés entre eux, différemment, mais aussi que d'autres devront vraisemblablement être préservés. (Potvin, 2018, p. 284)*

Cet extrait montre que les modèles de transformation conceptuelle se sont plus intéressés à la structure interne des conceptions alternatives des apprenants. Cela laisse entrevoir une opération cognitive complexe qui exige qu'on agisse moins brutalement sur les conceptions alternatives et qu'on évite aussi de les attaquer brutalement comme c'est le cas dans les modèles de remplacement. Dans ce contexte, le rôle des conflits cognitifs demeure toujours important, mais ces derniers ne sont plus forcément considérés comme la pierre angulaire du changement des conceptions (Potvin, 2018).

Parmi les modèles qui envisagent le changement conceptuel sous forme d'une transformation des conceptions, nous avons celui de Giordan (1989). Il est plus connu dans les milieux francophones de recherche en didactique des sciences (Bêty, 2010 ; Potvin, 2018). Pour André Giordan, la transformation conceptuelle comporte plusieurs indicateurs pratiques et explicites que sont: trouver du sens aux savoirs, être motivé, se confronter, être perturbé, avoir confiance, savoir imaginer, oser innover, pouvoir mobiliser ses savoirs, élaborer et réfléchir sur ses savoirs et enfin s'appropriier des aides à penser (Pellaud et al., 2005). Les aides à penser, dont il est question ici, sont tout ce que l'enseignant peut proposer à l'élève comme méthodes, comme outils et comme stratégies pour rendre l'apprentissage

plus accessible. L'usage simultané de plusieurs aides à penser dans une même situation d'apprentissage est fortement recommandé dans ce modèle selon Pellaud et Eastes (2003) cité dans Bêty (2010). Tous ces paramètres didactiques permettent de réaliser la déconstruction et la reconstruction des conceptions existantes. Lesquelles conceptions qui sont à la fois des obstacles au sens de Gaston Bachelard (c'est-à-dire erronées et résistent au changement) et des cadres explicatifs dont disposent l'élève en un instant pour interpréter et comprendre le monde (Giordan, 1989 ; Giordan & Vecchi, 2002). Elles sont également concrètes (puisqu'elles se manifestent par les savoirs des élèves), abstraites (puisqu'elles sont des modes de pensée qui découlent de raisonnements implicites et explicites), et enfin reliées entre elles par champ conceptuel (Bêty, 2013). André Giordan donne à ce modèle le nom de modèle allostérique en analogie avec les protéines allostériques qui changent de configuration selon l'environnement où elles se trouvent (Pellaud et al., 2005).

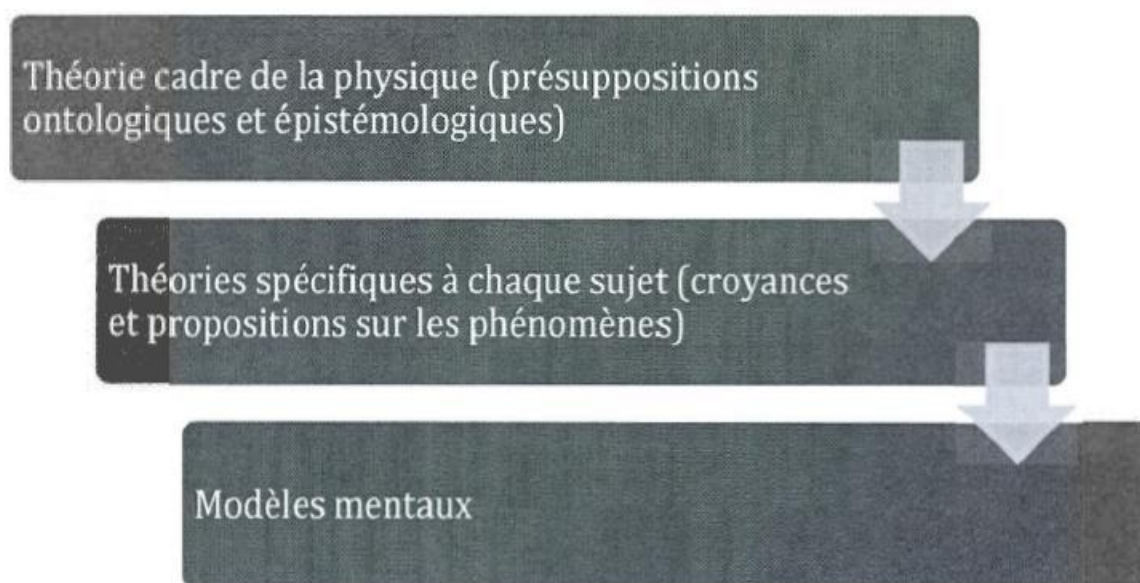
Ainsi, dans le modèle d'André Giordan, il est présumé que l'élève doit se sentir concerné par le sujet traité pour être motivé, ce qui l'aide à passer plus facilement de la conception alternative à la conception scientifique visée. Une étude didactique menée, sur le rôle des croyances motivationnelles dans le changement conceptuel en sciences physiques, par Elizabeth Linnenbrink et Paul Pintrich (Limón & Mason, 2002) appuie cette thèse. Car les résultats auxquels ils ont abouti suggèrent que la prise en compte de la motivation des élèves, plus précisément de leurs objectifs de réussite et de maîtrise (c'est-à-dire l'utilisation de stratégies cognitives complexes, l'affection positive et la persévérance dans le but de comprendre la matière) favorisent le développement d'une compréhension plus fine des concepts scientifiques. C'est la raison pour laquelle André Giordan propose d'amener l'élève à prendre conscience de sa structure mentale, de son importance et de ce qu'il peut en faire pour que ce dernier puisse donner du sens aux savoirs qui sont mis à sa disposition. Tout de même, il préconise à l'endroit des enseignants la patience pour que les élèves comprennent le rôle positif de l'erreur dans le processus d'apprentissage et prennent conscience qu'ils en ont droit (Bêty, 2010, 2013). Enfin, la stratégie que Giordan préconise pour la mise en œuvre de ce modèle est basée sur le conflit cognitif. Mais il attire aussi l'attention sur le fait que la transformation des conceptions n'est pas spontanée. Il faut prendre du temps en classe pour mettre en place les différents paramètres de l'environnement didactique qui favoriseront le travail collectif (Bêty, 2010).

Comme autre modèle, nous avons celui de Vosniadou (1994) qui envisage plutôt le changement conceptuel comme une révision qui s'opère à deux niveaux ou fragments. Un

premier qui est le niveau des théories cadres (*framework theory*) établies tôt dans l'enfance et servant de guide pour l'interprétation de phénomènes observés. Dans les théories cadres, l'on retrouve des guides ou présupposés interprétatifs ontologiques qui portent sur les types d'entités supposées existantes et la façon dont elles sont catégorisées, et des guides interprétatifs épistémologiques concernant quant à elles la nature des explications et la nature de l'apprentissage (Bélanger, 2008). Enfin, un deuxième qui est le niveau des théories spécifiques constituées d'un ensemble de croyances et de propositions qui visent à expliquer des phénomènes précis sous les contraintes de la théorie cadre (Vosniadou, 1994). Elles constituent la base à partir de laquelle est généré un modèle mental pour une situation spécifique (Bélanger, 2008) comme l'indique le schéma de la figure 20.

**Figure 20**

*Les modèles mentaux résultent des théories naïves selon le modèle de Stella Vosniadou proposé en 1994 traduit par Bêty (2013, p. 37)*



Dans la mise en œuvre de ce modèle, la réalisation d'un changement des conceptions doit commencer par la prise en compte des théories explicatives naïves et cohérentes construites par les apprenants sur le fonctionnement des phénomènes physiques à partir de leurs expériences personnelles. Puisque ce sont elles qui guideront le processus futur d'acquisition de nouvelles connaissances par les apprenants. Par la suite, le changement conceptuel va se produire si les apprenants sont exposés à un enseignement scientifique qui ne correspond pas à leurs représentations mentales existantes, mais qui est susceptible de créer des incohérences et des instabilités dans leurs écologies conceptuelles. Pour cette

étape, Vosniadou (1994) présume que les discussions en groupe et entre l'élève et le maître jouent un rôle important dans le processus de changement. Elle recommande, à ce sujet, de proposer aux apprenants les activités qui vont créer un conflit sociocognitif chez ces derniers. Il s'agit de proposer des problèmes aux élèves suivis de matériel à manipuler afin qu'ils expriment leurs modèles mentaux ; inviter les apprenants à débattre et à discuter entre eux pour qu'ils prennent conscience de leurs modèles mentaux et des concepts en jeu ; donner l'opportunité de comparer leurs explications avec celles d'experts ; enfin planifier l'enseignement des concepts à long terme (Vosniadou, 2008). Enfin, Stella Vosniadou présume que le changement conceptuel souhaité aboutit si les apprenants perçoivent la nécessité de résoudre les incohérences conceptuelles. Ce processus de résolution des incohérences internes dans les connaissances des apprenants est un processus graduel qui peut se traduire par une progression des modèles mentaux (Limón & Mason, 2002).

En somme, dans le modèle de Stella Vosniadou, les conceptions alternatives sont à la fois un obstacle au changement puisque qu'elles doivent être révisées et un vecteur de changement puisque l'existence conflictuelle naît dans le système cognitif suite à l'arrivée d'une nouvelle connaissance. Ainsi, ce modèle conçoit le changement conceptuel dans l'apprentissage scientifique comme un processus de modification graduelle de modèles mentaux qui peut prendre deux formes différentes suivant l'orientation qu'il a donnée aux conceptions alternatives : soit il peut s'effectuer par enrichissement des modèles existants (acquisition de nouvelles connaissances), soit par révision interne du modèle mental (évaluation et modification de la connaissance existante) (Vosniadou, 1994). Enfin, pour Stella Vosniadou, pour observer un changement conceptuel durable, les présuppositions fondamentales doivent être profondément et graduellement modifiées plutôt que remplacer brutalement comme recommandent les modèles de remplacement ; ou plutôt que d'impliquer le processus d'organisation de fragments de connaissances isolés comme c'est le cas dans le modèle d'André diSessa qui sera présenté plus tard.

Un autre modèle qui aborde le changement conceptuel dans le sens de Stella Vosniadou est celui de Michelene Chi. Elle conçoit, à son tour, la réussite d'un apprentissage des concepts scientifiques suivant trois cas distincts en fonctions de connaissances préalables dont disposent les apprenants. Dans le premier cas, il s'agit des apprenants ne disposant pas de connaissances préalables sur les concepts à apprendre. Pour cette catégorie, bien qu'ils aient peut-être certaines connaissances connexes sur le sujet, ils manquent de connaissances antérieures et l'apprentissage consistera à intégrer les nouvelles connaissances

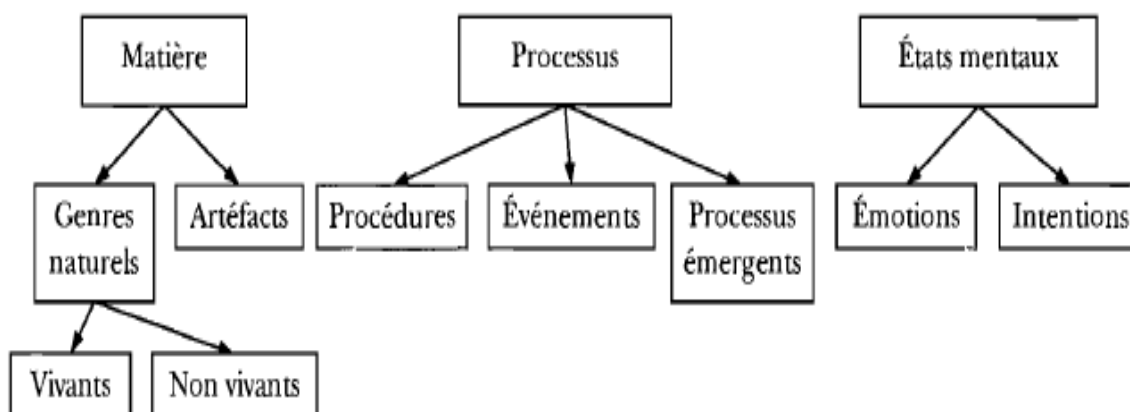
dans le système cognitif. Dans le second cas, il s'agit des apprenants qui ont des connaissances préalablement correctes, mais incomplètes sur les concepts à apprendre. Pour cette catégorie, l'apprentissage peut être conçu comme un comblement des lacunes. Dans ce cas, l'acquisition des concepts va se faire par l'enrichissement du ou des modèle(s) existant(s). Dans le troisième et dernier cas, il s'agit des apprenants qui ont les conceptions alternatives construites soit à l'école, soit dans la vie de tous les jours sur l'objet d'apprentissage et qui entrent en conflit avec les concepts à apprendre. Dans cette dernière catégorie, et contrairement aux deux premiers cas, l'acquisition de nouvelles connaissances est conçue comme un processus de changement des conceptions. Ainsi, l'apprentissage dans ce cas consiste plutôt à transformer les conceptions alternatives en conceptions scientifiques (Chi, 2008). Suivant cette dernière perspective (troisième cas) qui est la plus complexe parmi les trois, Michelene Chi présume que lorsque les modèles mentaux des apprenants sont initialement basés sur leurs conceptions alternatives formant ensemble un tout cohérent, ces conceptions alternatives doivent être réparées afin de promouvoir une compréhension profonde des concepts scientifiques.

Pour obtenir un changement conceptuel qui aboutit à une compréhension profonde des concepts scientifiques, le modèle de Michelene Chi recommande de procéder par un apprentissage basé sur la catégorisation conceptuelle en fonction de certaines propriétés des concepts scientifiques. Parmi ces propriétés, nous avons les caractéristiques perceptives, les attributs conceptuels et l'appartenance à une catégorie (Chi, 2008). Elle a illustré ces propriétés par l'exemple d'un rouge-gorge qui a la poitrine rouge (caractéristique perceptuelle), vit dans un climat tempéré (un attribut conceptuel) et appartient à la catégorie des oiseaux. Pour Chi (2008), la catégorisation est le processus d'identification ou d'affectation d'un concept à une catégorie à laquelle il appartient. Une fois un concept catégorisé, il peut hériter des caractéristiques et des attributs de son appartenance à une catégorie. Michelene Chi a illustré de nouveau cet héritage par l'exemple précédent des rouges-gorges. Pour elle, étant donné que les rouges-gorges sont des oiseaux et que les oiseaux pondent des œufs, on peut en déduire que les rouges-gorges eux aussi pondent des œufs même si on ne nous a jamais appris ce fait. Cet exemple peut s'étendre en chimie, car du moment où on connaît les propriétés des halogènes (Fluor (F), Chlore (Cl), Brome (Br), Iode (I), Astate (At) et Tenessine (Ts)) par exemple, il n'est plus nécessaire d'apprendre par cœur les propriétés de chacun d'eux étant donné qu'ils ont, chacun à son tour, hérité de ces propriétés.

De plus, en dehors de la présomption selon laquelle la catégorisation permet aux nouveaux concepts d'hériter de propriétés catégorielles, Michelene Chi pense le changement conceptuel en termes de changement des catégories ontologiques que Potvin (2018) a surnommé les ressources conceptuelles plus grandes que les conceptions. Pour ce faire, elle a, en particulier, exploré comment les humains catégorisent les choses dans le domaine des sciences. Les résultats qu'elle a obtenus plaident en faveur d'une distinction entre les différentes catégories ontologiques et les regroupent en au moins trois « arbres » ontologiques totalement distincts : la matière, les processus et les états mentaux qui, à leur tour, peuvent se ramifier en d'autres branches ontologiquement distinctes et plus fines (Bélanger, 2008) comme l'indique le schéma de la figure 21.

**Figure 21**

*Les principales catégories ontologiques proposées par Michelene Chi et ses collaborateurs en 1994 (Bélanger, 2008, p. 84).*



D'après ce schéma, il n'est peut-être pas viable de déplacer quelque chose d'un arbre ontologique de base à un autre. Une telle situation est illustrée en chimie par la distinction entre les objets matériels du laboratoire (fioles coniques, Bécher, ballon, etc.), des processus chimiques (oxydation, dilution, la dissolution, etc.) et des expériences mentales (imagination de la géométrie d'une molécule chimique) qui sont différents et non facilement transférables d'une catégorie à l'autre (Taber, 2019). De ce point de vue, une conception alternative est définie comme un concept mal catégorisé et le changement comme un processus de réparation des conceptions alternatives et des modèles mentaux en trouvant de nouvelles catégories dans lesquelles les concepts mal catégorisés peuvent être placés (Limón & Mason, 2002). C'est-à-dire élaborer un autre cadre de penser qui est ontologiquement différent du modèle mental de base et qui permet de passer d'une catégorie ontologique à



une autre plus pertinente puisque les catégories ontologiques ont une relation latérale entre elles (Chi, 2008 ; Chi & Roscoe, 2002). Autrement dit, le changement conceptuel se produit lorsque les étudiants parviennent à avoir une meilleure capacité à construire et à identifier une explication scientifiquement exacte et complète, impliquant une réorganisation substantielle ou des révisions de leurs structures de connaissances existantes qui étaient noyées dans des conceptions alternatives (Li et al., 2021).

De façon plus générale, pour accomplir un changement conceptuel, Michelene Chi suggère aux enseignants de repérer au préalable toutes les conceptions alternatives des apprenants sur les concepts dont on veut leur faire acquérir. Une fois cette étape terminée, elle suggère d'enseigner d'abord aux élèves la nouvelle catégorie ontologique et ses propriétés générales dont ces concepts en font partie, en menant avec eux les activités qui les aident à prendre conscience que les concepts à l'étude, qu'ils avaient mal catégorisés au départ, font effectivement partie de cette nouvelle catégorie. Enfin, pour empêcher les élèves de développer des nouvelles conceptions alternatives sur la nouvelle catégorie ontologique, elle invite les enseignants à ne pas faire d'analogies - qui prêtent à confusion - entre l'ancienne et la nouvelle catégorie ontologique construite. En définitive, le changement conceptuel suivant la perspective de Michelene Chi signifie passer d'un modèle mental défectueux ou incomplet à un modèle mental correct par l'assimilation (c'est-à-dire l'ajout de nouvelles connaissances) et la révision (c'est-à-dire la correction de connaissances). Il s'agit d'un processus progressif qui consiste à modifier de nombreuses petites connaissances, plutôt qu'un processus d'adaptation soudaine (Chi, 2008 ; Chi & Roscoe, 2002).

Mais, en dehors de l'aspect des conceptions alternatives isolées qu'il faille réorganiser ou réaffecter, un autre modèle emblématique de changement conceptuel s'oppose radicalement aux modèles basés sur le conflit cognitif présentés précédemment. Il s'agit du modèle de diSessa (1993) qui envisage plutôt le changement conceptuel comme une structuration de fragments de savoir isolé lors de l'apprentissage de contenus spécialement ardu (diSessa, 2017). Ce modèle décrit le système cognitif des apprenants comme une connaissance en pièces ou en morceaux<sup>33</sup> qui constitue un ensemble de *p-prims*<sup>34</sup>

---

<sup>33</sup>La Connaissance par Morceaux (CpM) désigne un large cadre théorique et empirique, dédié à la compréhension des phénomènes d'enseignement et d'apprentissage (diSessa, 2017).

<sup>34</sup>Les *p-prims* ou les primitives phénoménologiques sont des éléments de connaissance intuitive qui constituent pour des sujets leur « sens du mécanisme », c'est-à-dire ce qui les amène à considérer certains faits comme évidents, certains comme vraisemblables, certains comme invraisemblables, et fournit les explications ou les réfutations de possibilités réelles ou imaginaires (diSessa, 2017). De plus, on emploie le terme

(*phenomenological primitives*) activables suivant les situations. Selon ce modèle, les élèves ne formulent pas leurs conceptions à partir de théories bien élaborées, mais plutôt à partir d'habitudes interprétatives intuitives et élémentaires (*p-prims*). Ces *p-prims* sont appelés par Potvin (2018) des ressources conceptuelles plus petites que les conceptions. Suivant cette perspective, l'apprentissage est vu comme la transformation d'un système complexe en un autre, avec éventuellement beaucoup d'éléments qui demeurent communs au cours du changement, mais qui sont organisés différemment (diSessa, 2017). Vu sous cet angle, Andréa diSessa considère les conceptions alternatives des élèves comme des systèmes fluides et instables qui doivent être transformés pour devenir des systèmes ayant une plus grande et large stabilité organisationnelle et fonctionnelle (conceptions scientifiques), même s'ils contiennent les éléments communs aux systèmes du départ. Ainsi, suivant ce modèle, les conceptions alternatives des élèves - telles que les *p-prims* - forment la base du changement conceptuel parce que leur organisation implique la qualité de la conceptualisation future.

En ce qui concerne la mise en œuvre de ce modèle, Andréa diSessa recommande de prendre en considération ce que les élèves ont en tête avant l'enseignement afin de les amener à structurer autrement leurs fragments de savoir lorsqu'ils sont face à un problème à résoudre. Il s'agit, comme nous l'avons supra mentionné, de prendre en compte les petites connaissances intuitives simples, abondantes et naturelles que ces derniers utilisent pour comprendre leur expérience. Ce qui requiert une analyse profonde de l'écologie conceptuelle des élèves avant qu'ils ne reçoivent un enseignement (diSessa, 2017). Enfin, pour que le changement conceptuel ait lieu, Andréa diSessa préconise aussi d'intégrer ces petites connaissances intuitives dans des systèmes explicatifs plus complexes où elles seront utiles. Cela pour qu'elles ne fonctionnent plus comme des explications monolithiques isolées (Limón & Mason, 2002), mais font plutôt partie d'un système plus large. Pour ce faire, l'utilisation de modèles visuels et manipulables est nécessaire. Cela permettra vraisemblablement aux apprenants d'expérimenter avec les univers qui ont des caractéristiques qui rejoignent leur intuition, puis avec des univers qui présentent des caractéristiques différentes, idéalisées, pouvant ultimement les aider à voir les choses différemment (Bêty, 2010).

---

phénoménologique parce que ces éléments sont issus de leur expérience vécue et de primitive parce que ces éléments sont plus fondamentaux pour les apprenants que les conceptions scientifiques (Potvin, 2018).

D'une manière générale, pour devenir un expert suivant le modèle d'André diSessa, un élève doit coordonner ses morceaux de connaissances en un ensemble structuré en fonction du contexte. C'est pour cette raison que dans la mise en œuvre de ce modèle, l'accent doit plutôt être mis sur le sens causal en lien avec le développement de concepts et la résolution de problème que sur le développement de concepts ou sur la résolution de problème (Bêty, 2010).

#### **4.4.3. Conclusion partielle sur les modèles de remplacement et les modèles de transformation conceptuelles: leurs apports et leurs limites**

Qu'ils prônent le remplacement des conceptions ou la transformation des conceptions contrainte par l'utilisation des ressources cognitives plus petites (*p-prims* ou intuitions) ou plus grandes (catégories ontologiques), les modèles présentés précédemment fournissent des cadres puissants pour planifier des stratégies d'enseignement et d'apprentissage qui sont susceptibles de favoriser la construction d'une compréhension significative des concepts scientifiques. À son tour, ladite construction, si elle est bien faite, favorisera le développement de la pensée créative des apprenants. C'est-à-dire amènera les élèves à produire des explications ou des idées qui sont nouvelles pour eux et, en même temps, appropriées dans le sens où elles sont scientifiquement plausibles, concises et cognitivement économiques (Rees & Newton, 2020).

Outre cela, ces modèles ont pour point commun le fait qu'un temps suffisamment long est nécessaire pour voir le changement conceptuel se produire. Or, le processus de changement conceptuel ne fait pas nécessairement l'unanimité entre les différents chercheurs et sa compréhension varie considérablement d'un auteur à un autre en fonction de son positionnement philosophique. Par exemple, les modèles de Vosniadou (1994), de Chi (2008) et de diSessa (1993), bien qu'ils militent tous en faveur d'une transformation des conceptions, sont distincts radicalement quant à la nature du processus de changement. Alors que Stella Vosniadou insiste sur la prise en compte des présuppositions et des croyances des théories naïves dans la planification de l'enseignement ; Michelene Chi insiste, à son tour, plutôt sur le déplacement des concepts à travers les frontières ontologiques dans la planification de l'enseignement et Andréa diSessa insiste, quant à lui, sur un enseignement qui tiendrait plutôt compte des relations causales (*p-prims*) et de leur emploi dans différents contextes. Par ailleurs, Andréa diSessa est le seul auteur qui s'oppose vivement au conflit cognitif, lequel, selon lui, bafoue les idées des élèves.

Cependant, malgré la pluralité des modèles qui ont été élaborés pour favoriser le changement conceptuel, certaines préoccupations importantes demeurent. Nous avons par exemple celle de savoir pourquoi certaines idées fausses ou préconçues appelées dans le cadre de cette recherche conceptions alternatives persistent-elles ? Et pourquoi sont-elles si difficiles à corriger ? Face à ces préoccupations, plusieurs chercheurs du domaine ont fait les constats selon lesquels : le changement conceptuel est un processus difficile et complexe vu le degré d'affection que certains apprenants accordent à leurs idées préconçues. De plus, les élèves ne sont pas toujours conscients de leur incompréhension, car dans la plupart des cas, ils ne disposent pas des ressources cognitives « alternatives ou adéquates » pour réparer ladite incompréhension. Ces constats ont ainsi amené plusieurs autres chercheurs dans le domaine de l'enseignement/apprentissage à explorer et envisager d'autres perspectives pour le processus de changement conceptuel. D'où l'avènement des nouveaux modèles basés sur la coexistence conceptuelle et développés grâce aux résultats obtenus en neurosciences cognitives de l'éducation (Potvin, 2018).

#### **4.5. Modèles de coexistence conceptuelle**

Avant d'entrer dans le vif du sujet de présentation des modèles de coexistence conceptuelle, nous allons situer au préalable le contexte dans lequel ils ont émergé.

##### **4.5.1. Apports des neurosciences cognitives dans le domaine de l'apprentissage des sciences**

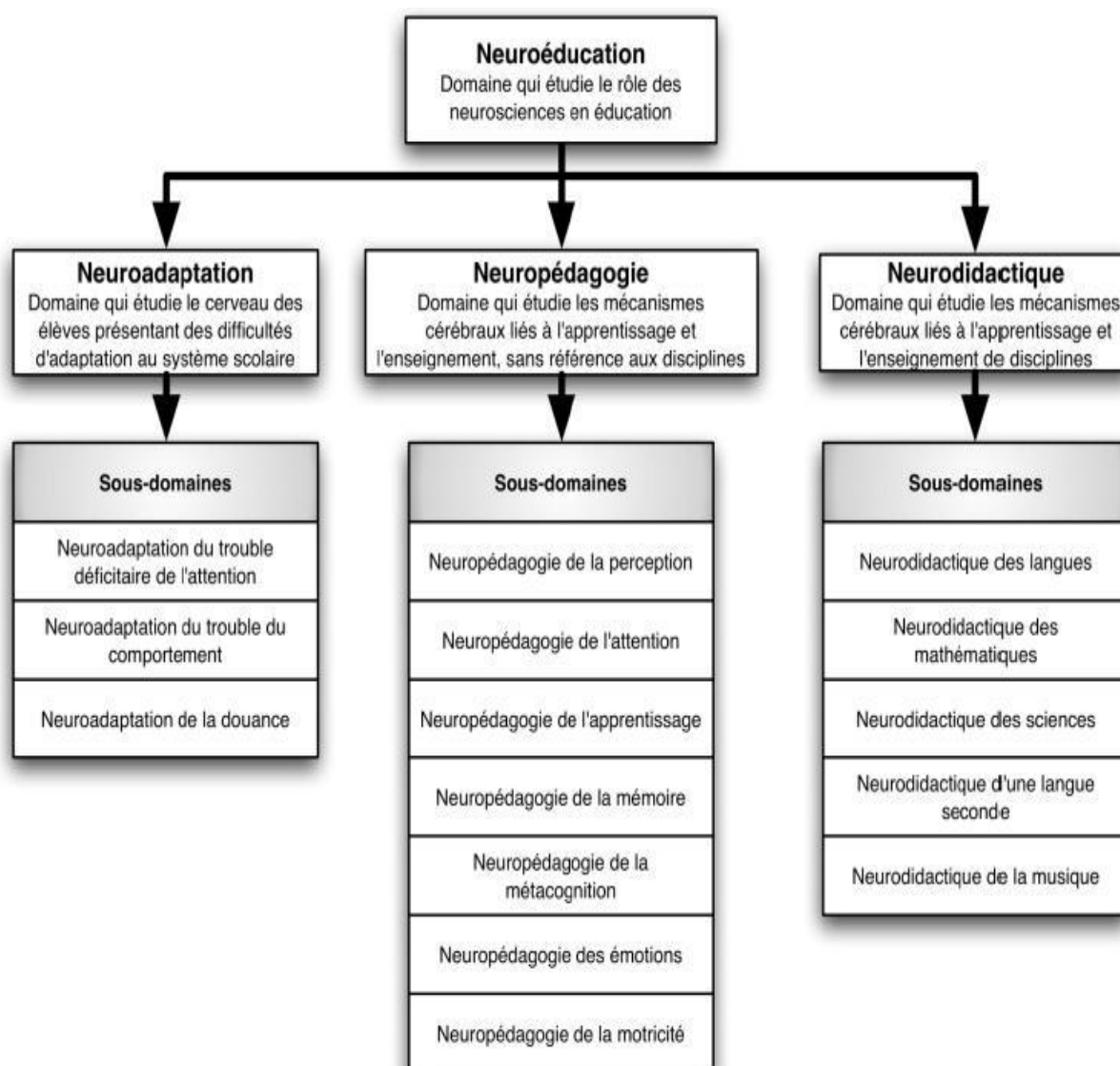
Pour comprendre le mécanisme cérébral complexe de changement conceptuel qui accompagne le processus cognitif de conceptualisation dans le domaine d'apprentissage des sciences, plusieurs recherches neuroscientifiques continuent d'être menées sur le fonctionnement du cerveau lorsqu'il est impliqué dans des tâches cognitives. Ces nouvelles recherches, qui font partie d'une sous-discipline scientifique des neurosciences cognitives en plein essor appelé la neurodidactique des sciences ou encore la neuroéducation au sens plus large, mettent à la disposition de la communauté scientifique des données de plus en plus récentes sur le fonctionnement cognitif du cerveau (Berthier et al., 2018 ; Masson, 2007).

Les neurosciences cognitives ont donc pour objectif d'identifier et de comprendre le rôle des mécanismes cérébraux impliqués dans les différents domaines de la cognition (perception, langage, mémoire, raisonnement, apprentissages, émotions, fonctions

exécutives, motricité, etc.). Alors que la neuroéducation (ou neurosciences cognitives de l'éducation) qui est sa sous-discipline vise à comprendre et à décrire les processus psychologiques et les mécanismes cérébraux qui sous-tendent les apprentissages scolaires fondamentaux (lire, écrire, compter, raisonner, respecter autrui, etc.) (Berthier et al., 2018) comme le résume le schéma de la figure 22.

**Figure 22**

*Principaux domaines de recherche en neuroéducation (Masson 2007, p. 311)*



Les neurosciences cognitives ont émergé grâce à la création au début des années 1990 d'une nouvelle technologie, appelée l'imagerie par résonance magnétique fonctionnelle (IRMf), qui a permis aux chercheurs de visualiser pour la première fois le cerveau *in vivo* pendant la résolution d'une tâche de manière totalement non-invasive (Berthier et al., 2018).

Grâce à cette technologie, comprendre le fonctionnement du cerveau en conditions réelles d'apprentissage qui, autre fois, était impossible (Plumat et al., 2019), est tout simplement devenu une réalité. Elle a permis, non seulement de visualiser les réseaux cérébraux engagés dans la résolution d'une tâche en étudiant la concentration en oxygène du sang dans les différentes régions du cerveau, mais aussi de visualiser la structure (épaisseur, volume, surface) des différentes parties du cerveau (IRMa)<sup>35</sup>, leur connectivité (fibres de matière) et leur anatomie (IRMd)<sup>36</sup> (Berthier et al., 2018). Sur ces possibilités nouvelles qu'offrent les études d'IRMf sur le fonctionnement cérébral en situation réelle d'apprentissage, Stanislas Dehaene, l'un des chercheurs francophones du 21<sup>e</sup> siècle le plus influent du domaine des neurosciences cognitives, déclare lors de sa leçon inaugurale en 2006 au collège de France:

*Les lois psychologiques, même si elles peuvent être exprimées sous forme d'algorithmes formels, ne seront comprises en profondeur que lorsqu'elles auront été mises en relation avec les différents niveaux d'organisation du système nerveux et c'est l'imagerie cérébrale qui donne accès à l'architecture fonctionnelle et aux mécanismes des fonctions cognitives plus directement que la traditionnelle étude du comportement. (Rogalski, 2015, p. 42)*

Et parmi les divers questionnements sur l'apprentissage des sciences auxquels les neurosciences cognitives, plus particulièrement la neurodidactique des sciences, tentent d'apporter les solutions, y figurent :

*Quelle est l'influence de l'éducation scientifique sur le cerveau ? Existe-t-il des périodes sensibles pour apprendre les sciences ? Pourquoi certains élèves ont-ils de la difficulté à apprendre les sciences, alors que cela semble facile pour d'autres ? Quelles sont les meilleures façons d'enseigner ou d'apprendre les sciences ? Pourquoi, de façon générale, certains concepts scientifiques sont très difficiles à apprendre et que certaines conceptions erronées persistent même après avoir suivi un ou plusieurs cours de sciences ? (Masson, 2007, p. 313)*

Au travers de ces questionnements, cette nouvelle approche des apprentissages qu'est la neurodidactique des sciences, dont la souveraineté, l'exclusivité et la légitimité sont encore certes à venir, mais dont les apports sont résolument de plus en plus difficilement ignorable (Potvin, 2018), ont permis aux chercheurs de mieux comprendre les mécanismes

---

<sup>35</sup> L'imagerie par résonance magnétique anatomique

<sup>36</sup> L'imagerie par résonance magnétique de diffusion

neurocognitifs qui sous-tendent les grandes lois de l'apprentissage dans le cerveau humain (Berthier et al., 2018). Cela a permis d'établir un pont entre les connaissances sur le fonctionnement du cerveau, les mécanismes d'apprentissage et l'enseignement (Brault Foisy & Masson, 2022).

De cette façon, l'approche neurodidactique des apprentissages scolaires ne bat pas en brèche les modèles dites « classiques » de changement conceptuel présentés dans les sections précédentes. Tout au contraire, elle apporte à ces modèles une interprétation nouvelle permettant d'envisager les changements conceptuels quelque peu différemment. Selon celle-ci, les conceptions erronées ne seraient pas effacées lors du développement cognitif, mais resteraient et demeureraient dans la mémoire à long terme. Lors de l'exécution d'une tâche cognitive, il devient donc indispensable d'en inhiber l'action au profit des conceptions scientifiques que l'on souhaite voir émerger (Dunbar et al., 2007 ; Houdé, 2000 ; Lubin et al., 2012 ; Malenfant-Robichaud, 2018 ; Masson, 2012 ; Potvin et al., 2014 ; Potvin et al., 2020).

Mais pour mieux tirer profit de ces avancées liées aux récentes découvertes sur les mécanismes cérébraux associés à l'apprentissage des sciences, nous présumons qu'il est nécessaire d'avoir certaines connaissances de base sur la structure, les fonctions cognitives et le fonctionnement de la « boîte noire » de l'apprentissage qu'est le cerveau. Ces connaissances sur la subtile mécanique neuronale qui gouverne les pensées et les intuitions correctes ou erronées de l'apprenant sont déterminantes pour mieux conduire un processus d'enseignement-apprentissage dans le domaine des sciences, étant donné qu'elles aident à comprendre les étapes par lesquelles il doit passer pour progresser et les facteurs qui l'aident à développer ses compétences (Dehaene, 2018). C'est la raison pour laquelle l'architecture et le fonctionnement du cerveau font l'objet d'une étude dans la section suivante.

#### **4.5.2. Architecture et fonctionnement du cerveau**

Dans cette partie, il est plutôt question pour nous de présenter certaines généralités sur l'organisation fonctionnelle de certaines parties importantes du cerveau impliquées dans le processus d'apprentissage, afin de faciliter la compréhension des concepts qui meublent le processus de changement conceptuel dans l'apprentissage des sciences suivant la perspective neurodidactique, que de procéder à une description profonde et complète de son fonctionnement. Une fois que cette précision est faite, nous pouvons noter que le cerveau,

reconnu à ce jour comme l'organe vivant le plus complexe de la nature, est un ensemble de structures situé au sommet de la moelle épinière (OECD, 2007). Plus rigoureusement, le cerveau est un ensemble de neurones et de cellules gliales qui alimentent et entretiennent les neurones (OECD, 2007). Il est une partie importante du système biologique qui gère l'ensemble des informations sensorielles et motrices, qui régule le fonctionnement de l'organisme et est également le siège des émotions et de la cognition appelé système nerveux. Son architecture ainsi que son fonctionnement – qui ont de tout temps interrogé les humains – sont au cœur du développement de la science du XXI<sup>e</sup> siècle (Berthier et al., 2018). C'est pourquoi la décennie des années 90 qui a été marquée par l'accroissement des connaissances neuroscientifiques et l'avènement de nouvelles technologies d'imagerie cérébrale est souvent désignée « décennie du cerveau » (Brault Foisy & Masson, 2022).

Encore appelé encéphale, le cerveau a une masse moyenne d'environ 1,5 kg et représente à peine 2 % du poids de notre corps, mais reçoit grâce aux artères carotides près de 20 % du sang (et donc des apports en glucose et dioxygène). Il forme avec la moelle épinière les composantes du système nerveux central situé dans le crâne et qui se prolonge dans la colonne vertébrale (Fortin, 2022), alors que l'ensemble des autres nerfs forment le système nerveux périphérique (Berthier et al., 2018). Le cerveau, baignant dans le liquide céphalo-rachidien qui est entouré par trois enveloppes protectrices appelées les méninges, est constitué de deux hémisphères (droit et gauche) qui contrôlent l'ensemble de nos fonctions mentales supérieures : mouvements volontaires, pensée, apprentissages, mémoire, etc. (Fortin, 2022). L'hémisphère droit gère la partie gauche du corps et l'hémisphère gauche gère la partie droite du corps (Berthier et al., 2018 ; Fortin, 2022). Par exemple, lorsque quelqu'un touche notre bras gauche, l'information est transmise à notre hémisphère droit et traitée dans ce même hémisphère et c'est vice-versa. De même, lorsque nous bougions notre pied droit, l'information initiale qui a provoqué la commande du mouvement provient plutôt de notre hémisphère gauche.

Les hémisphères du cerveau sont recouverts d'une mince couche externe située sous les méninges appelée cortex cérébral ou néocortex<sup>37</sup> ou encore matière grise dans laquelle résident les trois-quarts des neurones du cerveau humain (Fortin, 2022). Le néocortex, siège de la pensée humaine (OECD, 2007), fait partie des structures exerçantes des fonctions

---

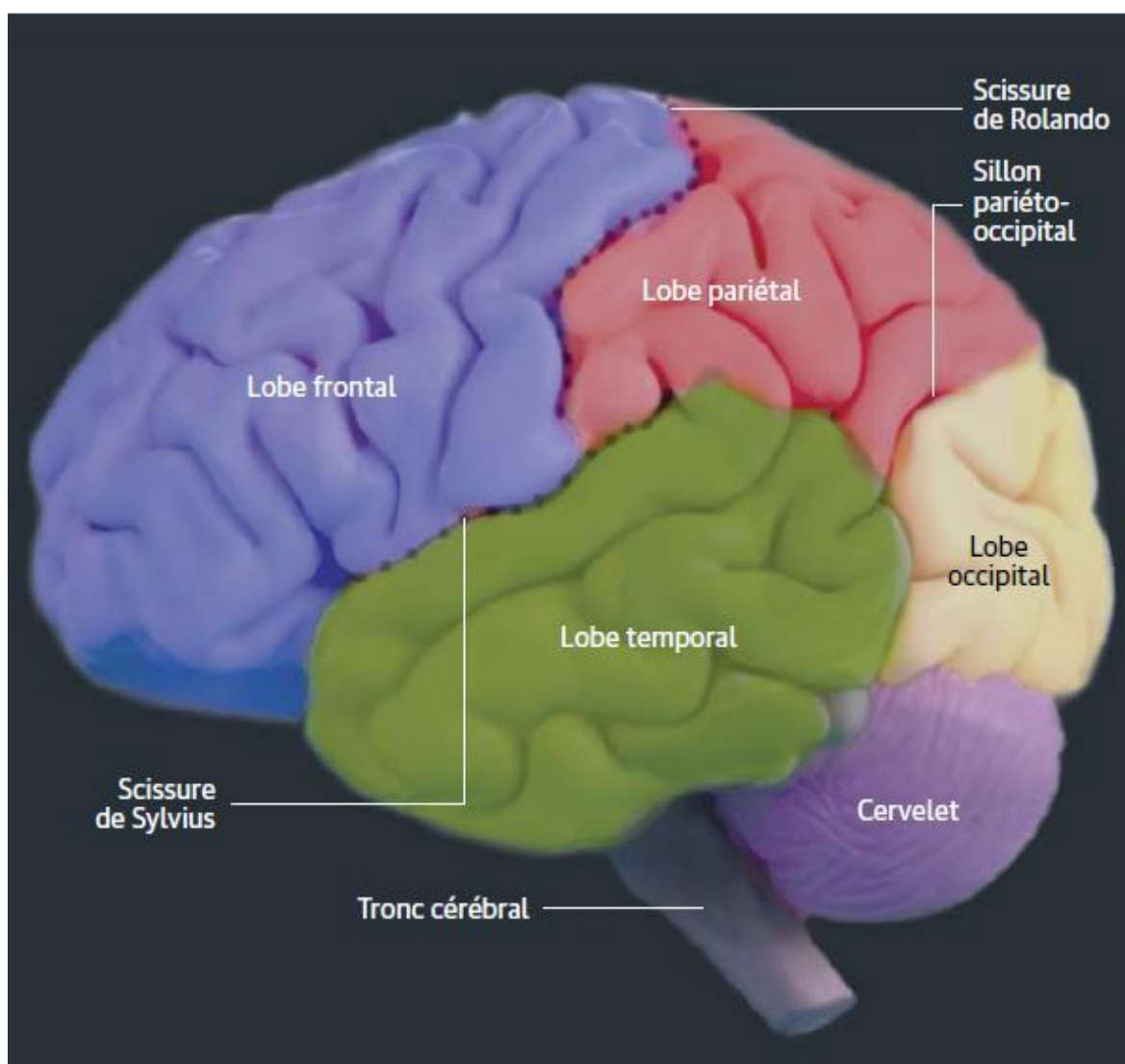
<sup>37</sup> Dans le nom néocortex, *néo* dérive du mot grec *neos* qui veut dire nouveau ou jeune. On parle de nouveau cortex, car il est absent chez les poissons, sommairement en ébauche chez les reptiles, peu développé chez les rats, mais apparaît bien structuré chez les mammifères (Fortin, 2022).



exécutives supérieures et qui ont le plus évolué chez l'être humain pour le différencier des autres mammifères animaux (Fortin, 2022). Sa surface est parsemée des sillons ou des replis appelés circonvolutions et se partage en quatre zones appelées lobes : le lobe frontal, le lobe pariétal, lobe temporal, lobe occipital (voir figure 23) et à l'intérieur, plus précisément sous la surface des quatre lobes, se situent les lobes limbiques et insulaires, chacun destiné à accomplir une ou des tâches différentes (Berthier et al., 2018 ; Fortin, 2022 ; OECD, 2007). Les deux hémisphères s'échangent les informations grâce à un pont ou ruban de fibres neurales baptisé « corps calleux » (OECD, 2007).

### Figure 23

*Disposition topographique des principales régions du cortex cérébral (Fortin, 2022, p. 56)*



Le lobe temporal situé sur le côté du cerveau se charge de l'exécution des diverses fonctions cognitives complexes telles que l'audition, la mémoire, la reconnaissance des

objets, le langage et les émotions. Le lobe pariétal situé en haut du cerveau est une zone associative permettant d'intégrer les informations provenant de différents canaux sensoriels et du traitement de l'espace (lecture, repérage dans l'espace, sensibilité...). Le lobe occipital situé à l'arrière du cerveau se charge de la vision et exécute les premiers traitements visuels. Le lobe frontal situé en avant du cerveau se charge de l'exécution des fonctions cognitives les plus complexes comme la planification des actions (le raisonnement, la mémoire, la prise de décision, la personnalité, jugement, mouvements etc.). Le cervelet situé à l'arrière du tronc cérébral et sous les lobes occipitaux permet à l'organisme d'avoir des réflexes, de coordonner ses mouvements et de garder l'équilibre. Le tronc cérébral relie les hémisphères cérébraux à la moelle épinière et contrôle les fonctions vitales de l'organisme telles que les battements du cœur, la respiration, la tension artérielle, la mobilité des yeux, les mouvements du visage et la déglutition. C'est donc grâce à la moelle, considérée comme le prolongement du cerveau vers la périphérie, que le cerveau communique avec tout le reste du corps. (Fortin, 2022 ; OECD, 2007 ; Plumat et al., 2019).

Cependant, les résultats de recherches neuroscientifiques et plus particulièrement neurodidactiques montrent que le lobe frontal est d'un grand intérêt dans la compréhension des mécanismes cérébraux liés à l'apprentissage et en particulier à l'apprentissage des sciences comme nous allons le montrer plus tard. Sa zone la plus à l'avant appelé cortex préfrontal joue un rôle majeur dans les fonctions exécutives telles que la mémoire de travail, la flexibilité mentale et l'inhibition. Le cortex préfrontal est subdivisé à son tour en trois parties : le cortex préfrontal dorsolatéral (CPF<sub>DL</sub>), le cortex préfrontal ventrolatéral (CPF<sub>VL</sub>) et le cortex cingulaire antérieur (CCA) (Fortin, 2022 ; Plumat et al., 2019 ; Potvin, 2018). Les cortex dorsolatéral et ventrolatéral sont les sièges des fonctions exécutives comme l'inhibition, la mémoire de travail et la flexibilité mentale ; et le cortex cingulaire antérieur est, quant à lui, associé aux mécanismes de détection d'erreurs, de prise de décisions et de gestion des émotions (Fortin, 2022 ; Masson, 2012 ; Plumat et al., 2019).

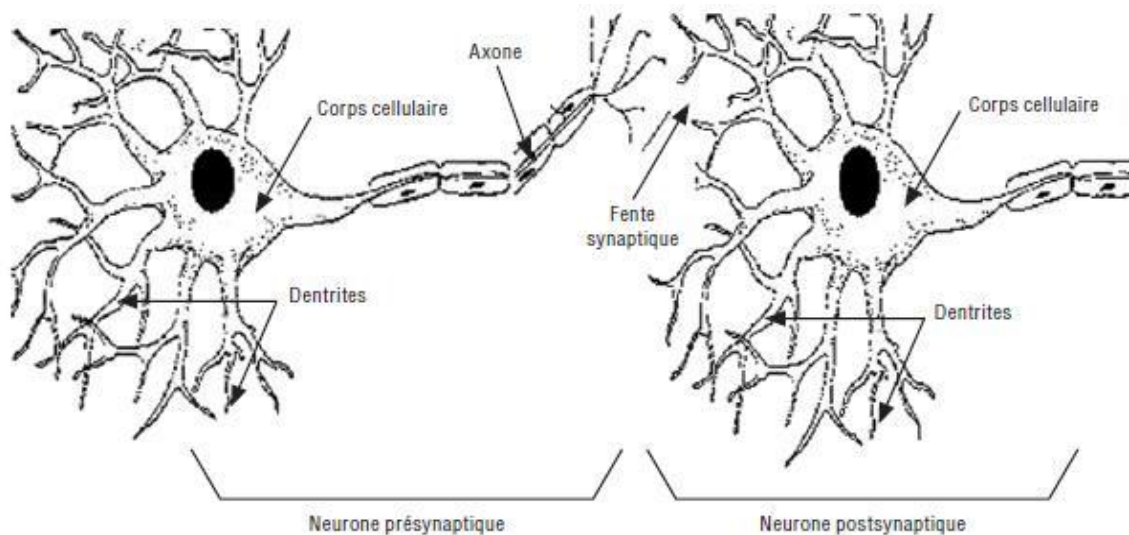
Une fois la présentation des différentes parties du cerveau et leur rôle faite, nous devons aussi noter que pour son fonctionnement, le composant fondamental qui permet la connexion de ses différentes parties est le neurone. Il est formé d'un corps cellulaire contenant un noyau, à partir duquel rayonnent plusieurs expansions, nommées dendrite ou axone, selon le sens de propagation de l'influx nerveux (voir figure 24). Les dendrites, filaments hautement ramifiés, reçoivent l'influx nerveux en provenance d'autres neurones et le transporte vers le corps cellulaire du neurone qui le traite. L'information neuronale

issue de ce traitement est transportée par l'axone, long filament émanant du corps cellulaire et recouvert d'une couche de graisse (la myéline), vers d'autres neurones (OECD, 2007). Grâce à cette couche de graisse, l'information circule plus rapidement dans le neurone, car tout comme le fil électrique, l'axone transmet l'impulsion électrique plus rapidement s'il est isolé ou myélinisé. Or, à la naissance, la plupart des axones ne sont pas myélinisés, mais ils le deviennent avec le temps lorsque des couches de graisse se forment à leur surface (OECD, 2007).

Ainsi, le neurone est une cellule spécialisée dans la communication (traitement de l'information). Il est capable de se connecter avec d'autres milliers de ses semblables sous forme de réseaux pour permettre aux signaux d'informations qu'elle a accumulés de circuler massivement dans plusieurs directions à la fois (Fortin, 2022 ; OECD, 2007). Ce sont ces interconnexions qui définissent le processus mémoriels et d'apprentissage. Dans les réseaux neuronaux, chaque neurone communique avec un autre neurone en libérant par son axone un neurotransmetteur<sup>38</sup> dans la synapse<sup>39</sup>. Le neurone situé en amont de la synapse (neurone émetteur) est qualifié de « présynaptique » tandis qu'un neurone situé en aval (neurone récepteur) est qualifié de « postsynaptique » (OECD, 2007).

#### Figure 24

*Connexion synaptique entre deux neurones (OECD, 2007, p. 42)*



<sup>38</sup> Une substance chimique libérée par les neurones au niveau des synapses, et qui transmet l'information jusqu'aux récepteurs (OECD, 2007).

<sup>39</sup> Espace séparant deux neurones, par lequel un neurone transmet de l'information à un autre neurone appelé « cellule cible » ou « neurone postsynaptique » (OECD, 2007).

L'organisation fonctionnelle du cerveau est hautement spécialisée, car au cours du traitement de l'information, chaque partie du cerveau, constituée de très nombreux neurones interconnectés, accomplit les différentes tâches qui lui sont spécifiques (OECD, 2007). C'est la raison pour laquelle dans un cerveau, et de façon permanente, un très grand nombre de réseaux neuronaux sont simultanément actifs et chacun d'eux correspond à un état mental bien déterminé. Par conséquent, au fur et à mesure que les signaux d'informations ou influx nerveux<sup>40</sup> circulent à travers les connexions neuronales ou synapses, un autre groupe de neurones est activé et le cerveau passe à un autre état mental (Fortin, 2022 ; OECD, 2007). Mais, malgré le fait que chacune des zones ou aires cérébrales soit associée à un réseau de neurones affectés au traitement ou à l'exécution des fonctions cognitives parfois bien déterminées, il peut aussi arriver que plusieurs réseaux neuronaux soient associés à l'exécution des mêmes fonctions (OECD, 2007). Par exemple l'exécution des tâches complexes comme les calculs mathématiques, la reconnaissance des mots ou encore la résolution des exercices conceptuels en chimie qui nécessite une mobilisation coordonnée de plusieurs réseaux neuronaux spécialisés provenant des différentes aires cérébrales. C'est la raison pour laquelle, tout dégât infligé à l'un de ces réseaux ou aux connexions entre les différents réseaux sera préjudiciable à la compétence qu'ils déterminent et conséquemment aussi, à l'exécution de la tâche visée (OECD, 2007).

De façon globale, la perspicace mécanique neuronale qui sous-tend le traitement d'informations au niveau du cerveau montre que le niveau d'activation d'un neurone ou d'un groupe de neurones est une variable continue et circonstancielle qui rend son architecture fonctionnelle flexible et adaptative en fonction de son environnement. Cela fait du cerveau, un organe qui a une étonnante plasticité<sup>41</sup> pour nous permettre d'apprendre tout au long de notre vie (Berthier et al., 2018 ; Brault Foisy & Masson, 2022 ; Masson, 2014 ; OECD, 2007 ).

#### **4.5.3. Rôle fondamental de la plasticité cérébrale dans l'apprentissage**

Lorsque le neuropsychologue Stanislas Dehaene et ses collègues Ghislaine Dehaene-Lambertz et Lucie Hertz-Pannier ont examiné pour la première fois<sup>42</sup>, en 2002, le

---

<sup>40</sup> Le neurone génère et transmet une information sous la forme d'un influx nerveux qui n'est autre qu'un courant électrique (Fortin, 2022).

<sup>41</sup> Capacité extraordinaire des neurones à s'adapter et de se réorganiser.

<sup>42</sup> Première fois parce qu'avant cette expérience, les médecins considéraient tout simplement l'IRM comme un test anodin destiné aux examens purement anatomiques pour détecter des lésions cérébrales précoces (Dehaene, 2018, p. 79).

fonctionnement du cerveau d'un bébé normal de deux mois, dépourvu de toute pathologie, à l'aide de l'IRM fonctionnelle, afin de voir si, dès cet âge, les circuits du cerveau pouvaient s'activer sélectivement lorsqu'on lui fait écouter des phrases de sa langue maternelle, ils ont constaté qu'un réseau bien précis de régions cérébrales, le même que chez l'adulte, s'active déjà à cet âge (Dehaene, 2018). Ce résultat a considérablement contribué à montrer que le cerveau d'un nouveau-né dès la naissance, et même avant, possède déjà des structures cérébrales bien organisées qui leur confère des compétences et des intuitions fortes dans toutes sortes de domaines (objets, personnes, temps, espace, nombres, etc.). Ces compétences précoces de bébés montrent qu'ils viennent au monde avec un riche savoir et d'hypothèses universelles, contribuant ainsi à renforcer l'hypothèse constructiviste de l'apprentissage et à rejeter une fois de plus l'hypothèse selon laquelle le cerveau n'est qu'une ardoise vierge, une table rase, une page blanche uniquement capable d'absorber l'empreinte de son environnement (Dehaene, 2018). La recherche conduite par Stanislas Dehaene et ses collaborateurs ainsi que bien d'autres recherches neuroéducatives ont aussi contribué à montrer que cette organisation synaptique (connexions neuronales) précoce du cerveau ne reste pas inchangée, mais elle se modifie en permanence tout au long de la vie en fonction de ce que nous apprenons pour s'adapter à son environnement : c'est la neuroplasticité du cerveau (Dehaene, 2018 ; Berthier et al., 2018 ; Brault Foisy & Masson, 2022 ; Masson, 2012, 2014).

Ainsi, la neuroplasticité encore appelée la plasticité cérébrale ou encore la flexibilité du cerveau (OECD, 2007) contribue à montrer que le cerveau n'est donc pas un organe fixe avec une architecture stable comme on le pensait au paravent, mais il est dynamique avec une architecture cérébrale qui se modifie à tout moment pour s'adapter à différents contextes afin de développer de nouvelles habiletés (Brault Foisy & Masson, 2022). Cette découverte est très importante dans le domaine éducatif, car elle démontre que tout apprentissage réussi modifie profondément le fonctionnement et l'architecture du cerveau (Brault Foisy & Masson, 2022 ; Dehaene, 2018 ; Masson, 2014). Cela fait vraisemblablement de la plasticité cérébrale le seul mécanisme fondamental qui induit les changements qui sont observables sur le plan comportemental (Brault Foisy & Masson, 2022). Plus précisément, c'est grâce à la flexibilité cérébrale qu'au cours de l'apprentissage: certaines connexions qui ne sont pas utiles peuvent ainsi être éliminées ; de nouvelles connexions peuvent être créées et l'efficacité de certaines connexions déjà existantes peut être modulée à la hausse ou à la baisse, selon leur importance (Brault Foisy & Masson, 2022 ; Masson, 2014). C'est aussi

grâce à elle que, dans le domaine de la santé par exemple, une rééducation pour la récupération post-traumatique après un accident vasculaire cérébral est possible (Berthier et al., 2018).

Cependant, pour optimiser l'activation de ses connexions neuronales, il faut les solliciter régulièrement, afin que le cerveau se spécialise davantage pour stabiliser leur capacité de s'activer mutuellement (Brault Foisy & Masson, 2022 ; Dehaene, 2018). Cette règle psychologique fondamentale, reprise dans plusieurs recherches neuroéducatives, a été émise pour la première fois par le psychologue Donald Hebb<sup>43</sup> en 1949 (Dehaene, 2018). Stanislas Dehaene la résume par une formule simple : « *se coactiver, c'est se connecter* » (Dehaene, 2018, p. 95). Plus explicitement, lorsque deux neurones s'activent au même moment, leurs interconnexions se renforcent. Biologiquement, Stanislas Dehaene explique ce fait de la manière suivante: si le neurone émetteur ou présynaptique en activité (décharge) parvient à se faire entendre par le neurone récepteur ou postsynaptique qui entre lui également en activité, la synapse va se renforcer et à l'avenir, la transmission entre ces deux neurones sera encore plus efficace. Dans le cas contraire, c'est-à-dire le neurone présynaptique décharge mais échoue à se faire entendre par celui postsynaptique, la synapse va s'affaiblir et finira par s'éteindre (Dehaene, 2018). Dans un tel cas, dès que l'apprenant, à travers son cerveau, est au contact d'un contenu d'apprentissage particulier, les connexions neuronales sont créées ou renforcées, d'autres sont affaiblies ou éliminées, selon les besoins (Brault Foisy & Masson, 2022). C'est à travers ce principe que l'activité nerveuse est consolidée puis stabilisée ; et les circuits qui ont bien fonctionné par le passé sont renforcés, pour que la même activité ait plus de chances de se reproduire (Dehaene, 2018). À ce sujet, Jean-Luc Berthier et ses collaborateurs écrivent :

*Quand on apprend quelque chose, des réseaux de neurones sont donc modifiés. À chaque reprise de l'information nouvelle, le réseau de neurones associés va se renforcer : le nombre de connexions va augmenter, les synapses seront plus efficaces et les messages nerveux vont circuler plus vite. Cette consolidation des connexions des neurones au sein d'un même réseau constitue la base biologique des apprentissages et de la mémorisation. Plus les réseaux sont consolidés, moins les éléments d'apprentissage correspondants sont oubliés. À l'inverse, un*

---

<sup>43</sup> Donald Hebb (1904-1985) était un psychologue canadien. Il a publié, en 1949, un ouvrage intitulé : *Organization of Behavior: A Neuropsychological Theory*. Dans cet ouvrage, il a établi une loi psychologique nommée loi de Hebb qui stipule que : si deux neurones se trouvent en activité au même moment et de manière répétée, leur connexion sera renforcée (à travers une croissance anatomique ou une modification métabolique), et l'activation de l'un par l'autre sera par la suite facilitée.

*réseau de neurones qui n'est jamais stimulé ou peu utilisé se déconnecte progressivement, les neurones se connectant à d'autres réseaux. De ce fait, on oublie.* (Berthier et al., 2018, p. 54)

Cet extrait montre également que la plasticité cérébrale permet de réorganiser les réseaux neuronaux préexistants pour: intégrer de connaissances nouvelles, consolider la mémoire, avoir une compréhension plus profonde des objets d'apprentissage, favoriser les feedbacks et inhiber les pensées ou actes non-pertinents.

Dans le domaine de la didactique des sciences physiques, pour mieux expliquer la consolidation des connexions des neurones et ses retombées sur l'apprentissage et l'enseignement des sciences et technologies, les chercheurs en neurodidactique des sciences comme Patrice Potvin et Stève Masson établissent une analogie avec la création de sentiers au cœur d'une forêt. Pour ces derniers, l'établissement de nouvelles connexions neuronales au début d'un apprentissage est toujours difficile et exigeant. Il est parsemé d'embuches comme c'est le cas lors de la création d'un nouveau sentier pour se déplacer d'un point A à un point B au cœur d'une forêt sauvage et densément peuplée d'une végétation abondante. Mais, avec le temps lorsque ce sentier est de plus en plus emprunté, il devient une voie privilégiée pour passer rapidement du point A au point B. En revanche, si le sentier n'est plus emprunté pendant un certain temps, il va disparaître progressivement et les herbes, les arbustes et les arbres y reprennent lentement leur place. Pour Patrice Potvin et Stève Masson, c'est presque le même mécanisme similaire qui se met en place dans le cerveau au début de chaque apprentissage. Car l'apprenant n'ayant pas encore développé ses « sentiers », c'est-à-dire les connexions neuronales requises pour effectuer la tâche qu'on lui demande, il doit s'entraîner, en répétant plusieurs fois ladite tâche. Cela pour que les neurones cérébraux sollicités s'activent davantage et deviennent donc de plus en plus connectés pour permettre aux influx nerveux de circuler dans le cerveau plus aisément et efficacement vite. Par la suite, si ces réseaux construits ne sont plus mobilisés, ils vont se défaire progressivement pour disparaître comme dans le cas des sentiers d'une forêt qui ne sont pas entretenus ; justifiant ainsi le phénomène d'oubli de certains apprentissages effectués par les élèves (Brault Foisy & Masson, 2022 ; Masson, 2016 ; Potvin, 2013).

Heureusement, d'après Stanislas Dehaene, tout n'est pas perdu lorsqu'un réseau des neurones construit et non mobilisé s'éteint ; leurs souvenirs restent dormants, inconscients et bien inscrits dans l'anatomie des circuits neuronaux du cerveau. Et plus tard, grâce à la plasticité cérébrale, il suffira seulement qu'un indice soit associé à une expérience passée pour que le cerveau parvienne à recréer de proche en proche une configuration d'activité

neuronale similaire à celle du réseau disparu pour se souvenir de lui ; c'est le rappel en mémoire (Dehaene, 2018) ou la récupération en mémoire (Masson, 2016). Ce principe psychologique qui nous permet de comprendre le phénomène d'oubli, montre que la mémoire n'est donc pas le fait d'une seule région du cerveau (Dehaene, 2018) – elle est partout, et les circuits cérébraux associés à chaque région jouent un rôle important dans la récupération ou le rappel en mémoire (Berthier et al., 2018 ; Dehaene, 2018 ; Masson, 2016). À cet égard, bien que le concept de mémoire reste flou et continue d'évoluer (Dehaene, 2018 ; Tardif, 1997), Stanislas Dehaene distingue au moins quatre sortes de mémoire :

- la mémoire de travail ou la mémoire à court terme. Elle est considérée à juste titre comme le niveau de la conscience qui reçoit et traite les informations provenant de l'environnement filtrées au préalable par les récepteurs sensoriels et les informations ou représentations mentales provenant de la mémoire à long terme requises par les exigences d'une tâche à effectuer (Tardif, 1997). Par la suite, elle conserve, pendant un très court moment, ces informations ou ces représentations mentales à l'état actif ainsi que l'assemblée de neurones actifs qui les sous-tend et vont disparaître au bout de quelques secondes dès que nous sommes distraits. Son fonctionnement repose principalement sur l'activation des circuits neuronaux situés dans le cortex pariétal pour traiter des informations numériques ou spatiales et sur l'activation des circuits neuronaux du cortex préfrontal pour traiter les informations visuelles ou verbales et résister aux interférences et aux distracteurs (Berthier et al., 2018). Par exemple, c'est la mémoire de travail qui nous permet de garder un numéro de téléphone en tête pendant le temps qu'il nous faut pour le composer dans notre téléphone ;
- la mémoire épisodique qui permet à une personne de se souvenir et de prendre conscience des événements qui ont été personnellement vécus dans un contexte spatial et temporel particulier. Sa particularité réside au niveau du fait qu'elle nous permet de voyager mentalement dans le temps pour revivre les expériences passées et se projeter dans le futur, contrairement aux autres systèmes de mémoire qui sont plus orientés vers le présent. De plus, sa capacité est illimitée et les informations qu'elle contient sont beaucoup moins sujettes à l'oubli, surtout quand leurs souvenirs sont chargés d'émotion (Berthier et al., 2018). Son fonctionnement est principalement basé sur l'activité des neurones de l'hippocampe<sup>44</sup>. Ces neurones mémorisent le contexte de

---

<sup>44</sup> L'hippocampe est une structure située dans la profondeur des hémisphères cérébraux, en deçà du cortex, qui enregistre les épisodes forts ou moins forts de notre vie quotidienne (Dehaene, 2018).



chaque événement et les codifient (où, quand, comment, avec qui les choses se sont produites). Ils enregistrent l'épisode en question par des changements synaptiques de la sorte que nous pouvons nous les rappeler plus tard. Des données récentes suggèrent que l'hippocampe est une partie du cerveau très importante pour les apprentissages scolaires rapides. Car, dès lors que l'information apprise est unique, les neurones de l'hippocampe lui attribueraient une séquence de décharges spécifiques. Ces données suggèrent également que la mémoire épisodique mobilise aussi un vaste réseau de neurones du cortex préfrontal et des amygdales (siège des émotions) pour son fonctionnement et participe activement au rappel des informations contenues dans la mémoire sémantique ;

- la mémoire sémantique qui organise et établit des liens entre nos connaissances pour qu'elles soient réutilisées fonctionnellement plus tard (Tardif, 1997). Elle est donc le siège de l'ensemble des faits et des connaissances que nous avons acquis au cours de notre vie, qui meublent nos souvenirs et qui nous permettent de produire, de comprendre un langage, de percevoir et de donner du sens aux objets et aux facettes du monde qui nous environnent. Pour ce faire, puisque les souvenirs ne restent pas toujours dans l'hippocampe, pendant le sommeil le cerveau les rejoue et les déplace ainsi que les réseaux de neurones qui leur sont associés dans le néocortex qui est le siège de la mémoire sémantique où ces informations se transforment en connaissances permanentes et durables tout au long de la vie, même si elles sont sujettes à l'oubli (Berthier et al., 2018). Sa capacité est donc aussi quasiment illimitée et plusieurs données récentes montrent qu'il est nécessaire de faire appel régulièrement à ces connaissances pour qu'elles se consolident davantage ;
- la mémoire procédurale qui permet également de nous remémorer, de répéter et d'automatiser nos connaissances. Pour ce faire, lorsque nous répétons plusieurs fois la même activité (réciter un poème, calculer, jongler avec un ballon, faire du vélo...), les neurones du cortex et des circuits sous-corticaux finissent par se modifier afin que l'information circule mieux. Elle enregistre les configurations des activités routinières que nous pratiquons régulièrement et les informations qu'elle contient sont mobilisées sans aucun effort et très peu sujettes à l'oubli (Berthier et al., 2018). Elle mobilise essentiellement les neurones du cervelet et l'hippocampe ne joue plus aucun rôle, car c'est la répétition du geste qui transfère les informations stockées dans la mémoire vers un support implicite pour que le réflexe se maturise et s'automatise (Dehaene, 2018).

En définitive, le mécanisme de la plasticité cérébrale supra-présenté montre que pour apprendre, il faut changer les connexions dans son cerveau en renforçant ou en affaiblissant de synapses existantes grâce à l'activation de façon répétée de ses neurones (Masson, 2016 ; OECD, 2002). Pour ce faire, Masson (2014, 2016) recommande aux enseignants de choisir et de séquencer les activités pédagogiques, afin de s'assurer que pour chaque objectif d'apprentissage, les élèves aient la chance de mobiliser leurs savoirs ou habiletés et d'activer leur cerveau un assez grand nombre de fois. De plus, il attire l'attention des enseignants de ne pas engager les élèves dans une sorte de répétition passive (par exemple, demander aux élèves de lire à plusieurs reprises un texte ou de refaire le même type d'exercices un trop grand nombre de fois) qui ne participe pas à leur activation cérébrale, mais, peut plutôt, dans la majorité des cas, conduire à leur démotivation et désengagement total (Masson, 2016). Il suggère, à cet égard, d'engager les apprenants dans la résolution des tâches conceptuelles qui facilitent l'activation cérébrale et le développement de leur pensée créative (Rees & Newton, 2020). Enfin, le mécanisme de la plasticité cérébrale, au travers du système de fonctionnement des mémoires que nous avons aussi supra-présenté, nous permet aussi de comprendre pourquoi les élèves oublient souvent ce qu'ils apprennent. Puisque, si les neurones liés à un certain type d'apprentissage ne s'activent plus durant un certain temps, leurs connexions s'affaiblissent naturellement. Il nous permet également de comprendre le phénomène de résistance de certaines conceptions alternatives au changement, c'est-à-dire le pourquoi certaines erreurs des élèves sont très difficiles à corriger. Parce qu'elles résultent, pour plusieurs, des réseaux neuronaux qui sont très bien solidement établis dans le cerveau et rendant leur modification pas du tout facile (Masson, 2016). D'où la nécessité pour le cerveau d'apprendre à désapprendre certaines de ces proto-compétences liées à son architecture, pour en acquérir de nouvelles autres compétences.

#### **4.5.4. Influence du fonctionnement et de l'architecture du cerveau sur l'apprentissage**

Si l'apprentissage modifie le fonctionnement et l'architecture du cerveau grâce à son caractère flexible comme nous l'avons montré dans la partie précédente, réciproquement l'architecture du cerveau influence et contraint significativement la façon dont certains apprentissages scolaires peuvent prendre place dans le cerveau (Brault Foisy & Masson, 2022 ; Masson, 2014, 2016). Cette situation est due au fait qu'avant même qu'un nouvel apprentissage ne se réalise, le cerveau présente déjà une architecture initiale qu'il a hérité de notre évolution et des facteurs liés à son environnement (Brault Foisy & Masson, 2022 ;

Dehaene, 2018 ; Masson, 2016). Autrement dit, avant même la naissance, le cerveau du fœtus possède déjà tous les circuits de neurones nécessaires pour lui permettre de décoder les sons de la parole et de répondre sélectivement à un certain nombre d'objets et d'événements présents dans l'environnement qu'il a hérité du patrimoine génétique conçu au cours de l'évolution de l'espèce humaine. Cela lui permettra respectivement, plus tard, d'apprendre le langage humain et de dénombrer des objets pour effectuer des opérations arithmétiques de plus en plus complexes (Berthier et al., 2018 ; Dehaene, 2018).

Pour mieux expliquer cette contrainte qu'imposent l'architecture et le fonctionnement du cerveau sur certains apprentissages scolaires, Stanislas Dehaene a proposé la théorie du recyclage neuronal en s'appuyant sur les limites de la plasticité cérébrale à savoir que les capacités adaptatives des neurones ne seraient pas infinies, mais demeureraient sous certaines contraintes biologiques. Selon cette théorie, s'éduquer, c'est donc recycler la façon dont le cerveau est organisé, c'est-à-dire la façon dont les neurones sont interconnectés les uns aux autres, et chaque nouvel apprentissage scolaire réoriente un circuit neuronal préexistant dans une direction nouvelle en fonction des prédispositions organisationnelles du cerveau pour se modifier prioritairement d'une certaine façon plutôt que d'une autre, héritée au fil des millénaires. C'est pourquoi, pour lire ou pour calculer, les enfants s'appuient sur des circuits antérieurs qui ont évolué pour un autre usage, mais qui, grâce à leur marge de plasticité, parviennent à se réorganiser et à se spécialiser pour cette nouvelle fonction culturelle (Dehaene, 2018). De ce point de vue, Stanislas Dehaene écrit :

*Même si la plasticité synaptique est importante, surtout dans l'espèce humaine où l'enfance se prolonge pendant près de quinze ans, le cerveau humain reste soumis à des contraintes anatomiques fortes, héritées de son évolution. Dès lors, chaque nouvel objet culturel que nous inventons, tel que l'alphabet ou les chiffres arabes, doit trouver sa niche neuronale dans le cerveau : un circuit dont la fonction initiale est suffisamment similaire pour s'adapter à la nouvelle invention, et dont la flexibilité est suffisante pour être reconvertie à ce nouvel usage. Toute acquisition culturelle nouvelle n'est possible que dans la mesure où elle s'appuie sur une architecture neuronale préexistante, qu'elle recycle. L'éducation doit composer avec nos limites neuronales, en s'aidant de la diversité de nos circuits innés et des longues années d'immaturation cérébrale caractéristiques de notre espèce. (Dehaene, 2018, p. 125)*

D'autres études s'appuient plutôt sur la théorie de l'inhibition pour démontrer les contraintes exercées par l'architecture cérébrale sur certains apprentissages. Cette théorie a été évoquée implicitement pour la première fois en 1934 par le philosophe des sciences

Gaston Bachelard pour expliquer le développement cognitif dans le domaine d'apprentissage des sciences. Pour ce dernier, le développement de la pensée scientifique ne peut se réaliser qu'au prix d'une importante lutte contre les habitudes naturelles de la pensée (Bachelard, 1967). Malheureusement, une idée aussi brillante, peut-être parce qu'elle était en avance sur son époque faute de preuves scientifiques existantes à son temps, n'avait pas prospéré. C'est à partir de 1970 que l'un des fondateurs de l'approche néo-piagétienne du développement cognitif, le psychologue du développement Juan Pascual-Leone, en suggérant l'idée selon laquelle la croissance développementale de l'attention mentale et de la mémoire de travail jouerait un rôle important dans le développement cognitif, présuma également le rôle positif de l'inhibition dans ce processus en tant qu'un des facteurs ou opérateurs importants de cet accroissement (Ribaupierre, 2007). Dans sa perspective, Juan Pascual-Leone distingue également les schèmes ou structures, qui se construisent progressivement et qui correspondent au répertoire de connaissances d'un sujet, des mécanismes fondamentaux (opérateurs) qui ne sont pas liés à un contenu particulier, mais dont la fonction est de modifier la force d'activation des schèmes auxquels ils s'appliquent. De cette façon, il suggère par exemple que l'efficacité d'un opérateur comme le contrôle inhibiteur, chargé de désactiver les schèmes non-pertinents, augmentera avec le développement cognitif, mais aussi avec la capacité du sujet à apprendre à renoncer avec vigueur à utiliser certains schèmes mentaux lorsqu'ils ne sont plus pertinents dans un contexte. Ce qui justifierait pourquoi deux sujets de même âge, disposant, présumément, d'un même opérateur inhibiteur et de schèmes exécutifs efficaces, peuvent parfois différer face à l'exécution d'une même tâche cognitive; un, exécutant aisément et correctement ladite tâche, et l'autre le faisant, avec beaucoup de pénibilité (Pascual-Leone cité dans Ribaupierre, 2007). Malheureusement, dans son approche, l'impact des contenus de connaissances ainsi que son implication didactique n'ont pas été pris en compte.

Tenant compte de ces limites, Robbie Case<sup>45</sup> a pris en compte les contenus impliqués dans les grands domaines de connaissances dans l'étude du développement cognitif de

---

<sup>45</sup> Robbie Case (1944 - 2000) était psychologue canadien qui a suggéré pour la première fois, à partir de 1985, le concept de « structure conceptuelle centrale » considéré comme un réseau de concepts et de relations sémantiques qui ont un large domaine d'application et qui sont centraux pour le fonctionnement de l'enfant dans ce domaine. Ces structures sont considérées comme centrales parce qu'elles forment le « centre » conceptuel de la compréhension de l'enfant dans un éventail de situations et elles constituent aussi un noyau à partir duquel vont pouvoir se construire d'autres structures plus élaborées. Au travers de ce concept, il a redonné l'importance : aux contenus de la pensée ; de mieux tenir compte du contexte; et des connaissances préalables du sujet et de son environnement culturel et social dans l'étude de la structuration des connaissances et du développement cognitif de l'enfant (Ribaupierre, 2007 ; Rogalski, 2015).

l'enfant (Rogalski, 2015). Olivier Houdé a développé, à son tour, à partir de 1997 la théorie du contrôle inhibiteur pour expliquer le développement cognitif en milieu scolaire (Houdé et al., 2000 ; Houdé, 2000, 2007, 2019). Cette théorie, connue également sous le label « activation/inhibition » (Rogalski, 2015) diffère de la théorie piagétienne du développement cognitif par le fait qu'elle remet en cause le modèle en escalier ou en stade proposé par Jean Piaget comme nous allons le montrer dans la partie suivante. Selon cette théorie : « *Les enfants ont souvent accès à plusieurs stratégies ou schèmes pour résoudre un problème. Dans ces conditions, l'enfant doit inhiber les schèmes inadaptés pour ne choisir que ceux qui permettent de résoudre la tâche correctement* » (Houdé, 2007, p. 42). Le choix dont il est question ici est tout simplement l'activation de la stratégie pertinente pour résoudre la tâche.

La théorie d'Olivier Houdé est innovante, parce qu'elle ne conçoit pas seulement le développement cognitif en termes d'élaboration de nouvelles structures cognitives, mais également en termes de capacité d'inhibition et d'activation de certains automatismes de la pensée. Ainsi, à travers sa théorie, il présume qu'il est parfois primordial que certains automatismes de la pensée, causés possiblement par l'activation spontanée de réseaux de neurones solidement établis dans le cerveau, soient inhibés (c'est-à-dire bloqués ou désactivés) au profit de l'activation d'un autre plus pertinent dans le contexte pour résoudre un problème ou répondre correctement à une question. C'est le mécanisme du contrôle inhibiteur, c'est-à-dire une forme de contrôle cognitif et comportemental qui permet aux sujets de résister aux habitudes, aux automatismes, aux tentations, aux distractions ou aux interférences, et de s'adapter aux situations complexes par la flexibilité (Houdé, 2000). L'existence, et surtout, la persistance des réseaux de neurones liés à ces facteurs spontanés constituent également une contrainte cérébrale pouvant influencer les apprentissages scolaires. De ce point de vue, l'inhibition est considérée comme un facteur positif du raisonnement et la solution pour la correction du biais ou erreurs liés au raisonnement (Houdé, 2019).

De ce qui précède, l'éducation, et plus particulièrement l'apprentissage scolaire, consiste à recycler des circuits cérébraux anciens ou à les inhiber, sans les modifier génétiquement, pour les réorienter vers des activités nouvelles ou les bloquer lorsqu'ils sont indésirables. Et les hypothèses du recyclage neuronal et du contrôle inhibiteur nous permettent de comprendre les capacités singulières de l'espèce humaine à sortir de leur niche

écologique pour acquérir d'autres compétences aussi complexes telles que lire, écrire, compter, calculer, chanter, se vêtir, monter à cheval ou conduire une voiture, etc. qu'aucun autre primate ne possède vraisemblablement. De ce fait, grâce au régime draconien de l'école auquel les enfants sont de plus en plus soumis pour enrichir très tôt leur environnement et construire l'avenir de leur cerveau (Dehaene, 2018), ces capacités exécutives ainsi que la plasticité cérébrale de l'espèce humaine s'étendent sur de nombreuses années en leur conférant une remarquable faculté adaptative.

Cependant, la plasticité cérébrale humaine est contrainte temporellement, car des nombreuses données neuroscientifiques (Berthier et al., 2018 ; Brault Foisy & Masson, 2022 ; Dehaene, 2018 ; Masson, 2014, 2015, 2016) suggèrent que dans de nombreuses régions du cerveau, la plasticité est présente toute la vie, mais elle atteint son pic pendant un intervalle de temps limité, qui s'étend de la petite enfance jusqu'à l'adolescence, appelé période sensible d'apprentissage. Mais son intensité va baisser progressivement avec l'âge, sans être complètement bloquée ou fermée contrairement à ce qu'on a longtemps pensé. C'est pourquoi, l'enfance et l'adolescence constituent deux périodes fantastiques pour les apprentissages, puisqu'au cours de ces périodes, le cerveau est en pleine maturation et son cortex est facilement malléable et ses neurones se reconfigurent aussi beaucoup plus rapidement que plus tard dans la vie (Berthier et al., 2018 ; Dehaene, 2018). Ainsi, nous pouvons de ce fait, à tous les âges, faire de nouvelles acquisitions même si cela demande plus d'efforts à un cerveau adulte (mature) de se réorganiser sous la contrainte de chaque région cérébrale.

Toutes ces découvertes sur la faculté de l'apprentissage à modifier le fonctionnement de l'architecture du cerveau grâce à la plasticité cérébrale et sur la capacité de l'architecture cérébrale à contraindre certains apprentissages grâce au recyclage neuronal et à l'inhibition, sont aux antipodes de la caricature du tout inné ou du tout acquis (Dehaene, 2018) et montrent que le cerveau dès la naissance est à la fois structuré et plastique. Grâce à notre évolution, cette auto-organisation confère au cerveau des intuitions profondes de tous les grands domaines du savoir : une physique naïve des objets et de leur comportement, un sens des cartes et de la navigation dans l'espace, des intuitions du nombre, de la probabilité et des mathématiques et un véritable génie pour les langues, etc. (Dehaene, 2018). Au fil de cette évolution et en fonction de ses spécificités cérébrales, le cerveau s'est également doté de quatre fonctions majeures qui maximisent la vitesse avec laquelle il parvient à extraire

des informations dans son environnement pour effectuer de nombreux apprentissages dans les grands domaines du savoir. Ces quatre fonctions cognitives sont nommées par Stanislas Dehaene les quatre piliers de l'apprentissage scolaire qui sont :

- l'attention, qui est l'ensemble des mécanismes par lesquels notre cerveau sélectionne une information, l'amplifie, la canalise et l'approfondit. Elle joue un rôle très important dans la sélection de l'information pertinente et fonctionne comme un filtre à l'aide duquel le cerveau de l'élève bloque ou inhibe les distracteurs ou les informations non-pertinentes pour se concentrer sur le traitement de l'information pertinente (Berthier et al., 2018). De par son importance dans la sélection de l'information pertinente, elle est répliquée en de nombreux points du cerveau (Dehaene, 2018). Le psychologue américain Michael Posner repris par Stanislas Dehaene distingue au moins trois grands systèmes attentionnels : l'alerte, qui indique quand faire attention et être vigilance; l'orientation de l'attention, qui signale à quoi faire attention et amplifie tout objet d'intérêt et le contrôle exécutif (ensemble complexe de processus mentaux qui nous permettent de choisir un plan d'action et de nous y tenir (Berthier et al., 2018)) qui nous permet de prendre conscience de nos erreurs et décide de comment l'information sera traitée en lui choisissant et associant la chaîne de traitements appropriée, et contrôle son exécution. Pour Stanislas Dehaene, faire attention, c'est donc sélectionner, c'est-à-dire prendre le risque d'être aveugle à ce qu'on choisit de ne pas voir. Même comme être aveugle dans certaines circonstances peut conduire, à laisser passer un détail important face à une situation impactant vraisemblablement sa résolution. D'où la prudence et la concentration au cours du processus d'apprentissage ;
- l'engagement actif, qui détermine à quel degré il importe que l'apprenant soit attentif, actif, prédictif au maximum. L'un de ses fondements est la curiosité, c'est-à-dire l'envie d'apprendre, la soif de savoir, car plus la curiosité d'une personne est grande, plus son apprentissage augmente.

Plusieurs psychologues (William James<sup>46</sup>, Jean Piaget, Donald Hebb, Lev Vygotski<sup>47</sup>, etc.) s'accordent sur le fait que la curiosité est la manifestation directe de la motivation des enfants à comprendre le monde pour essayer d'en construire un modèle mental qui sous-tend leur compréhension. Pour Stanislas Dehaene, la curiosité se déclenche à chaque fois que notre cerveau détecte un décalage entre ce que nous connaissons déjà et ce que nous pourrions savoir. Et pour susciter la curiosité des apprenants et maximiser leurs apprentissages, il propose donc d'enrichir en permanence l'environnement des élèves d'objets nouveaux et stimulants, pour les maintenir actifs, afin de développer leurs facultés métacognitives. De plus, pour lui, le maintien de l'engagement actif des apprenants s'accompagne de la tolérance, par l'enseignant, des erreurs commises par ces derniers. Dans ce cas, l'erreur change de statut, car elle n'est plus considérée comme une faute, mais devient un outil pour enseigner et apprendre comme l'avait si bien suggéré Jean-Pierre Astolfi en 1997 ;

- le retour sur l'erreur, qui compare nos prédictions avec la réalité et corrige nos modèles mentaux du monde. Pour Stanislas Dehaene, dans le processus d'acquisition des connaissances ou des traitements d'informations dans le cerveau, chaque erreur détectée est une opportunité d'apprentissage, car c'est en détectant ses erreurs que le cerveau parvient à corriger ses modèles du monde. Autrement dit, l'apprentissage se déclenche lorsque le cerveau détecte un signal d'erreur ou une surprise. Plusieurs données consistantes issues des études neuroscientifiques du cerveau appuient l'idée selon laquelle toutes les aires cérébrales émettent et échangent des messages d'erreur,

---

<sup>46</sup> William James (1842 - 1910) était un philosophe, historien et psychologue américain qui a fondé la psychologie scientifique américaine en créant le premier laboratoire de psychologie à Harvard (1891) juste après la publication de son livre intitulé : *The Principles of Psychology* (1890), où il a élaboré la théorie de conscience et des émotions. Pour lui, la conscience guide les modifications physiologiques ou corporelles qui produisent en nous des émotions : « Je vois un danger, je tremble, et cela crée la peur » (Houdé, 2019, p. 59, traduction libre). Principe qui servira plus tard à d'autres chercheurs en psychologie d'établir que ce n'est pas la perception du corps lui-même, mais des cartes neuronales reconstruites dans le cerveau qui traitent ces informations provenant du corps via des "boucles de simulation". Les recherches de James ont ouvert la voie aux États-Unis au domaine passionnant de l'étude expérimentale de la conscience et des émotions humaines, ainsi que les neurosciences cognitives actuelles (Houdé, 2019). De plus, James est aussi cofondateur, avec le sémiologue et philosophe américain Charles Sanders Peirce (1839 -1914), du courant philosophique du pragmatisme.

<sup>47</sup> Lev Vygotski (1896-1934) était un psychologue soviétique (Russie actuelle) connu pour ses recherches en psychologie du développement et sa théorie historico-culturelle du psychisme. Il est le fondateur du constructivisme social des apprentissages scolaires plus connu généralement sous le label socioconstructivisme, car pour lui le développement intellectuel de l'enfant est une fonction des groupes humains plutôt qu'un processus exclusivement individuel comme certains psychologues de l'époque, Jean Piaget, principalement le pensait.



et ce qu'une région cérébrale ne parvient pas à expliquer, elle le passe donc au niveau suivant, et celui-ci, à son tour, va tenter de le comprendre (Dehaene, 2018). Pour qu'un enfant ou un adulte apprenne efficacement et rapidement, Stanislas Dehaene suggère de fournir à ce dernier un environnement (qu'il s'agisse des parents, de l'école, de l'université, d'un jeu vidéo, etc.) qui lui permet, le plus rapidement et le plus précisément possible, le retour sur l'erreur pour se corriger. Pour ce faire, l'enseignant doit capitaliser avec les apprenants ce moment de retour sur l'erreur pour indiquer de façon détaillée et précise ce qu'il aurait fallu faire pour ne pas se tromper. Ce pilier résume subtilement les deux piliers précédents, car pour détecter l'erreur, il faut être attentif et curieux ; pour la corriger, il faut être engagé activement ; et pour éviter de la recommettre, il faut être attentif, concentré et vigilant ;

- la consolidation, qui automatise et fluidifie ce que nous avons appris, notamment pendant le sommeil. Pour consolider et rendre automatique les acquis, Stanislas Dehaene préconise la révision et la répétition. Parce qu'au départ, tout apprentissage exige des efforts intensifs et les modèles mentaux construits ne sont pas absolument certains, il suggère, bien évidemment, de répéter et de remettre en situation, nos opérations mentales plusieurs fois à de longs intervalles de temps pour convaincre le cerveau qu'elles sont précieuses, qu'elles le seront pour longtemps et qu'elles méritent donc d'être préservées. Ainsi, le cerveau, à travers ses mécanismes routiniers, va compiler et automatiser ces opérations mentales puis les transférer dans les régions du cerveau où elles pourront se dérouler inconsciemment, en toute autonomie, sans perturber les autres opérations en cours (Berthier et al., 2018 ; Dehaene, 2018). Ledit transfert se passe pendant notre sommeil, car c'est à ce moment que le cerveau répète les événements importants qu'il a enregistrés pendant la veille, et progressivement, il les transfère dans un compartiment plus efficace de notre mémoire. De plus, pendant le sommeil, notre cerveau peut même découvrir les solutions aux problèmes qui nous ont échappés pendant la période de veille (Dehaene, 2018).

En somme, les données que nous venons de présenter succinctement, au-delà de nous fournir des informations précieuses sur la manière dont le cerveau humain est organisé, fournissent également des informations sur comment le cerveau apprend de façon générale. Par exemple, ces données nous font savoir que dès la première année de naissance, chaque cerveau dispose déjà d'une vaste panoplie de connaissances sur les objets qui l'environnent. De plus, ces données montrent également que le changement conceptuel est un processus

très complexe, car le cerveau n'est pas qu'un vaste réseau de neurones malléable qui se laisse façonner aisément par ses entrées, et tant bien que la plasticité cérébrale soit indispensable, grâce au recyclage neuronal, il n'affine qu'une infime partie de ses connexions neuronales. De cette façon, nous devons profiter pendant la période dite sensible (bas âge jusqu'à la fin de l'adolescence), pour amener les élèves à effectuer le maximum possible d'apprentissages. Et durant cette période, étant donné que le cerveau de l'enfant demeure la plus puissante des machines à apprendre, il faut enrichir de manière permanente l'environnement de l'apprenant de telle sorte que sa soif de découvrir soit permanente. Entre autres, ces données permettent également de comprendre que se tromper fait partie intégrante de l'apprentissage, car l'erreur nous permet de corriger et de réajuster nos modèles mentaux préexistants. Et pour consolider les acquis, la révision permanente (répétition active) et le sommeil sont indispensables pour que notre cerveau intègre, codifie et transfère les modèles appris dans notre système de mémoire à long terme. Enfin, ces données, à travers Stanislas Dehaene, attirent notre attention sur le fait que chacun des quatre piliers que nous avons présentés est indispensable à nos constructions mentales et si un seul d'eux chancelle, c'est l'ensemble de l'édifice qui vacille. Par conséquent, l'apprentissage permet ainsi à notre cerveau de saisir une parcelle de réalité qui lui échappait auparavant en construisant en son sein, un nouveau modèle du monde.

Pour faciliter la construction desdits modèles, les ambitions socioconstructivistes et neurodidactiques se complètent mutuellement. La première examine les conditions externes (le milieu éducatif ainsi que le milieu de développement du sujet apprenant) dans lesquelles se déroulent l'apprentissage et la deuxième examine les conditions internes (le mécanisme cérébral) d'apprentissage pour mieux comprendre et planifier le processus enseignement-apprentissage. Par exemple, dans le domaine de la chimie et plus particulièrement celui de l'apprentissage du concept de concentration chimique, ces processus délicats et coûteux (en termes d'effort cognitif), que sont le recyclage cérébral et le contrôle inhibiteur, et les quatre grands piliers de l'apprentissage peuvent être capitalisés pour faciliter le changement conceptuel afin d'améliorer la conceptualisation et la mobilisation de ce concept par les apprenants. Car en entraînant de façon répétitive et à des intervalles de temps longs les apprenants à utiliser des circuits indirects ou des voies alternatives dans leur cerveau, cela peut amener ceux d'entre eux qui éprouvent des difficultés face à ce concept de réaliser, et de façon durablement, un changement conceptuel.

#### 4.5.5. Des études de neuroimagerie dans le domaine éducatif qui appuient l'idée de la coexistence des conceptions dans le cerveau

En guise de rappel, pour comprendre les mécanismes neuronaux qui sous-tendent l'acquisition des connaissances ou la construction des modèles mentaux dans l'apprentissage des sciences, les chercheurs en neurodidactique se basent généralement sur les images prises par plusieurs techniques d'imagerie. Ces images sont prises par caméra IRMf ou par caméra TEP<sup>48</sup>, pour ne citer que ces deux. La camera IRMf enregistre le signal *blood-oxygen-level dependent* (BOLD), qui est la quantité d'hémoglobine désoxygénée<sup>49</sup> qui se trouve en chaque endroit du cerveau en chaque intervalle de deux secondes au maximum et transforme ces enregistrements en images sur l'écran d'un ordinateur (Potvin, 2018). De même, la camera TEP enregistre le signal des positons<sup>50</sup> et transforme ces enregistrements en images sur l'écran d'un ordinateur. Par la suite, grâce aux calculs statistiques effectués par l'ordinateur de bord, les zones du cerveau où le signal sera plus fort sont identifiées en se basant sur le principe qu'elles consomment davantage plus d'oxygène ou d'énergie que les autres à cause de leurs intenses activations ou sollicitations lorsqu'elles sont impliquées dans la résolution des tâches cognitives.

Certaines études de neuroimagerie se sont basées plutôt sur les temps de réponse appelés la chronométrie mentale (Potvin et al., 2020), c'est-à-dire le temps chronométré en millièmes de seconde que met un participant (apprenant) pour répondre à une question qui lui est posée. Plusieurs d'elles concluent en faveur de la coexistence conceptuelle en interprétant les temps de réponse de plus en plus longs mis par les participants pour répondre correctement aux questions (même les plus évidentes) comme une conséquence de la persistance et de la coexistence des conceptions alternatives des apprenants avec les conceptions nouvelles ; même si à la fin, bien qu'elles aient activement impacté la résolution d'une question, elles ne prévalent pas (Potvin, 2018). Ces études ne seront pas présentées dans le cadre de cette thèse parce que dans la quasi-totalité des cas, elles sont menées hors

---

<sup>48</sup> Tomographie par émission de positrons

<sup>49</sup> L'hémoglobine est une protéine riche en fer qui se trouve dans les globules rouges, responsable de la couleur rouge du sang et qui transporte l'oxygène et extrait le dioxyde de carbone des organes et des tissus. Elle est désoxygénée lorsqu'elle ne contient plus d'oxygène.

<sup>50</sup> Les positons ou positrons sont des minuscules particules chargées positivement, émit par un produit radiopharmaceutique composé d'un radio-isotope fixé sur une substance, le glucose habituellement, qui s'accumule dans les cellules qui consomment beaucoup d'énergies (cellules cancéreuses par exemple) ou qui sont en activité (régions cérébrales), lorsqu'il est injecté dans l'organisme.

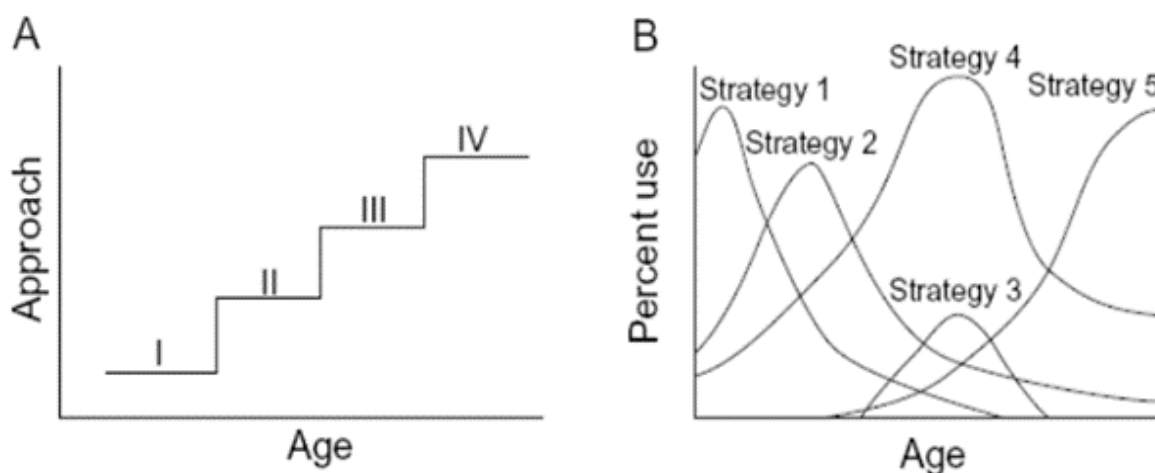
du contexte scolaire avec les durées d'expérimentations en laboratoire très courtes. De plus, elles ne visent pas aussi à identifier souvent ce qui peut modifier significativement la structure et le fonctionnement de la pensée lors des interventions didactiques de plus longue durée et de plus grande extension conceptuelle (Rogalski, 2015), par exemple la conceptualisation de la concentration chimique. Néanmoins, certains pionniers du domaine ont tenu compte de cette variable, qui tendait déjà à disparaître dans les recherches en didactique (Rogalski, 2015), dans leurs différents travaux.

En intégrant dans leurs travaux, l'étude des effets d'un apprentissage sur les processus d'inhibition, Houdé et al. (2000) ont comparé l'activité cérébrale d'étudiants français (19-26 ans) ayant des difficultés sur le raisonnement logique à l'aide de la tomographie par émission de positrons (TEP). Lors de leur étude, ils ont scindé les participants en deux groupes : un qui reçoit l'enseignement normal de la logique et un autre qui reçoit plutôt un enseignement par inhibition des heuristiques problématiques. Les résultats obtenus par ces auteurs montrent que les étudiants ayant reçu un enseignement logique normal ou habituel, répondaient toujours incorrectement aux questions (90 % d'échec) alors que ceux qui ont reçu un enseignement par inhibition répondaient mieux aux questions du post-test (plus de 90 % de réussite). Ces auteurs ont alors supposé que le contrôle inhibiteur soit considéré comme un pilier central du développement cognitif (Houdé et al., 2000). Dans leur recherche, Olivier Houdé et ses collaborateurs ont également montré que les étudiants qui ont subi un entraînement pour inhiber les heuristiques problématiques manifestaient une très nette reconfiguration – ou plasticité – des réseaux cérébraux, de la partie arrière du cerveau à sa partie avant (le cortex préfrontal) et une forte activation des neurones du système paralimbique de l'hémisphère droit dédiée aux émotions et à la peur de l'erreur (Houdé et al., 2000 ; Houdé, 2019).

Ces résultats ont permis à Olivier Houdé de remettre en cause le modèle de développement cognitif en stades de Piaget. Il parvient, en effet, à montrer que le développement de l'intelligence ne se fait pas nécessairement de manière linéaire, mais plutôt de manière discontinue. Pour lui, le modèle le plus adapté pour expliquer le développement cognitif est celui en vague proposé en 1999 par le psychologue américain Robert Siegler.

**Figure 25**

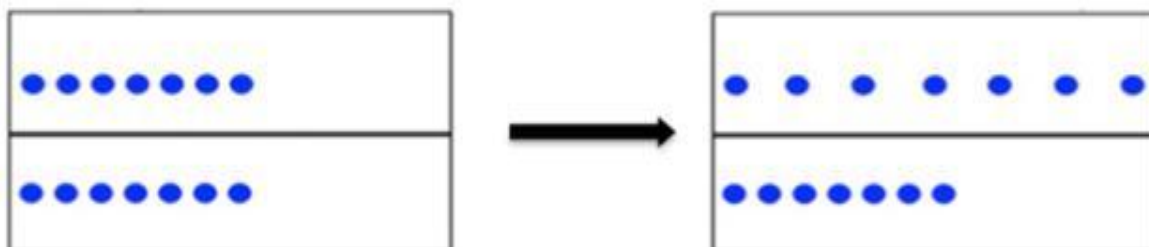
*Modèles cognitifs du développement: A=Modèle en escalier de Piaget et B= Modèle dynamique non-linéaire de Robert Siegler (Lubin, Lanoé, Pineau, & Rossi, 2012, p. 58)*



D'après ce modèle (B) adopté par Olivier Houdé, au fur et à mesure que le temps passe, l'enfant accumule un réservoir de stratégies qu'il utilisera davantage dans l'une ou dans l'autre situation. C'est la raison pour laquelle Olivier Houdé a réinterprété la tâche sur la conservation du nombre de Piaget où face à deux rangées de jetons de même nombre, mais de longueurs différentes (figure 26), il est demandé aux enfants (5-6 ans) de dire dans quel cas on aura le plus de jetons. Il arrive à la conclusion selon laquelle, pour réussir à cette tâche, l'enfant doit inhiber la stratégie « longueur égale nombre » qui est dans ce cas inefficace (Houdé, 2007) ; conclusion opposée à celle de Piaget selon laquelle l'enfant devrait attendre l'âge de six à sept ans (âge de raison) pour réussir à cette tâche, car avant cet âge, il n'aurait alors pas encore intégré le concept de nombre.

**Figure 26**

*La tâche de conservation du nombre de Piaget reprise par Olivier Houdé (Lubin, Lanoé, Pineau, & Rossi, 2012, p. 59).*

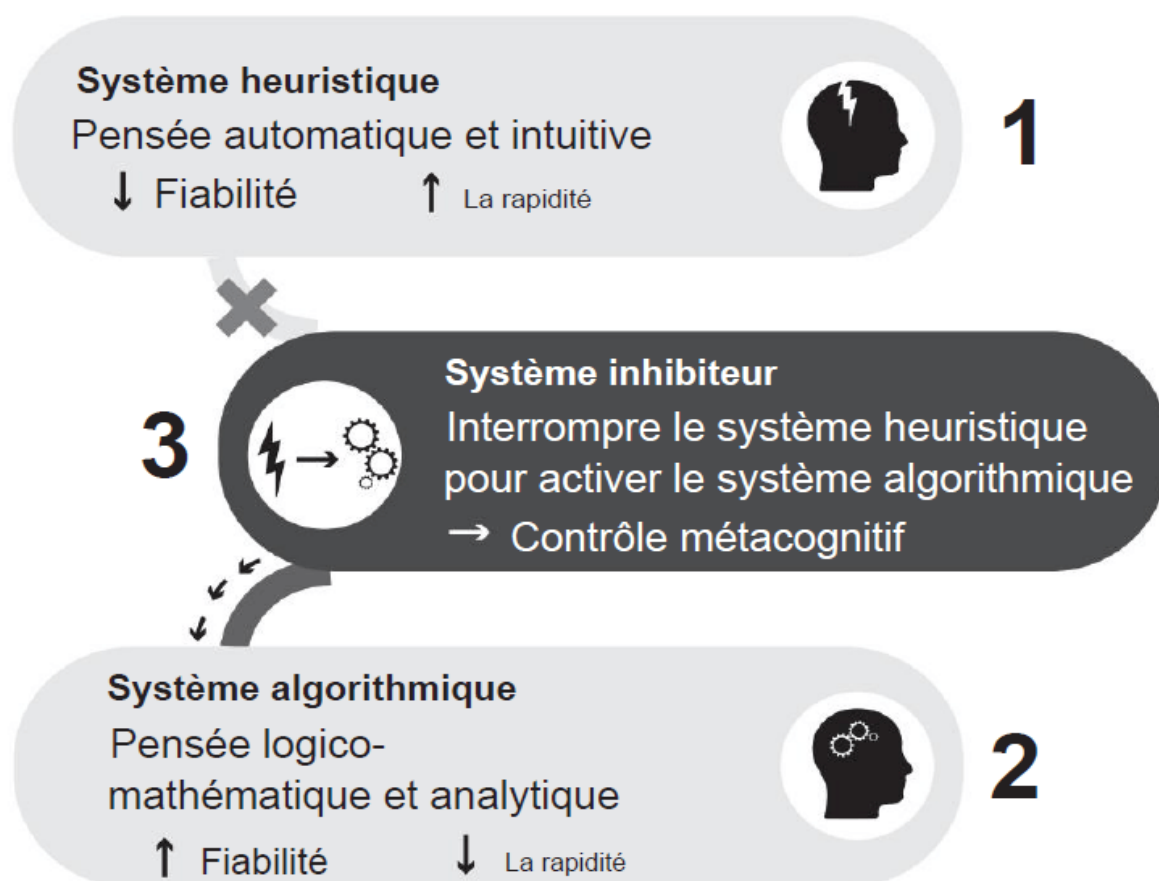


Pour Olivier Houdé, ce n'est pas toujours le fait que l'enfant n'ait pas intégré un concept qui pose problème, mais aussi, et surtout, la capacité à inhiber la stratégie inappropriée lorsqu'elle ne fonctionne plus. Ainsi, le développement cognitif ne se limiterait

plus seulement à l'assimilation-accommodation décrite par Piaget. Il faudrait ajouter à cela l'automatisation par la pratique et le contrôle par inhibition qui est une forme de contrôle cognitif et comportemental permettant aux sujets de résister aux habitudes, automatismes, tentations, distractions ou aux interférences, et de s'adapter aux situations complexes (Houdé, 2007). Au travers de ces résultats, pour décrire le processus de développement cognitif, Olivier Houdé a élaboré une théorie de trois systèmes cognitifs du cerveau comme l'indique la figure 27.

**Figure 27**

*Développement non linéaire de stratégies cognitives issues soit du système rapide et heuristique (intuitif) soit du système lent et algorithmique (logique) à tout âge (Houdé, 2019, p. 107 traduction libre)*



D'après cette schématisation, lorsque le système heuristique constitué des pensées automatiques et intuitives (système 1) entre en compétition avec le système algorithmique constitué, à son tour, des pensées logiques et analytiques (système 2), le cerveau fait appel au système inhibiteur (système 3), situé dans le cortex préfrontal, pour inhiber le système heuristique trop rapide et souvent peu fiable et activer le système logique et analytique très

fiable et moins rapide (Houdé, 2019). Cela nous permet de comprendre la façon dont le cerveau humain raisonne et décide pour produire des réponses à nos préoccupations. Ainsi les mécanismes de régulation et de contrôle cognitif dit exécutif du système d'inhibition et de résistance cognitive exercés par le cortex préfrontal pour faciliter l'expression du système logique permettent au cerveau de bien raisonner au cas par cas, afin d'être créatif (Houdé, 2014).

Pour étudier en profondeur les mécanismes cérébraux qui s'enclenchent lorsqu'un participant est face à une situation, plusieurs chercheurs ont plutôt utilisé les techniques d'IRMf. Dunbar et al. (2007) ont utilisé cette technique pour comparer l'activité cérébrale d'un groupe d'étudiants experts en physique et un autre groupe n'ayant suivi aucun cours de physique (non-expert) sur la mécanique. Les résultats auxquels ils sont parvenus montrent que les étudiants des deux groupes ont recouru à leurs anciennes conceptions naïves, d'après les parties de leurs cerveaux qu'ils ont activés lors de l'exécution des différentes tâches. De plus, les étudiants experts en physique sembleraient activer davantage les zones cérébrales cortex préfrontal (CPDL et CPVL) et le cortex cingulaire antérieur (CCA) liées respectivement à l'inhibition des conceptions naïves au profit des conceptions scientifiques et à la détection d'erreurs, ainsi qu'aux gestions de conflits cognitifs pour formuler les réponses correctes.

Masson (2012) arrive à la même conclusion en utilisant la même technique pour étudier en électricité le mécanisme cérébral des experts et des novices face à la conception selon laquelle un seul fil relié à une pile est suffisant pour allumer une ampoule. De plus, lorsque Stève Masson a comparé les activités cérébrales des experts à celles des novices, il a également constaté que les experts activaient davantage le cortex préfrontal et le CCA lors de l'exécution de cette tâche comparativement aux novices. Il a aussi constaté que le cerveau réagirait vraisemblablement de manière négative au conflit cognitif et chercherait plutôt à inhiber les informations qui entrent en conflit avec les attentes des participants. Résultats confirmés par plusieurs autres chercheurs en didactiques : Stavy et Babai, 2010 cité dans Potvin (2018) en géométrie ; Malenfant-Robichaud (2018) et Potvin et al. (2020) en chimie ; Allaire-Duquette (2018) dans différentes disciplines en science. De plus, en 2021, certains chercheurs ont passé en revue, la littérature sur le changement conceptuel dans les domaines d'apprentissages scientifiques du primaire au supérieur. Ces études visent à identifier les conditions dans lesquelles le conflit cognitif est déclenché avec succès pour éventuellement favoriser les changements conceptuels (Potvin, 2021) ou à comprendre les conditions dans

lesquelles la fonction exécutive d'inhibition joue un rôle dans l'apprentissage conceptuel (Mason & Zaccoletti, 2021). Les résultats auxquels ces chercheurs sont arrivés sont :

- lorsque le conflit cognitif est déclenché isolément, sans activités de traitement de soutien ou sans la disponibilité initiale des conceptions scientifiques ou d'alternatives conceptuelles, il est plutôt inefficace (Potvin, 2021) ;
- l'inhibition favorise la conceptualisation des notions spécifiques dans les domaines scientifiques d'après les études neuroscientifiques. Cela implique que les modèles complets de changement conceptuel devraient donc tenir compte du contrôle inhibiteur qui peut également expliquer les différences individuelles dans ce processus (Mason & Zaccoletti, 2021) ;
- les idées fausses ou conceptions alternatives ne sont pas remplacées par des conceptions scientifiques et ne s'éteignent pas aussi une fois que le changement conceptuel s'est produit. Au contraire, elles existent toujours à côté des conceptions scientifiques acquises et doivent être bloquées ou inhibées par moments lors de la mobilisation des conceptions scientifiques par les apprenants (Mason & Zaccoletti, 2021 ; Potvin, 2021).

Toutes ces recherches appuient également l'hypothèse de la coexistence conceptuelle (scientifique et/ou non-scientifique) plutôt que celle du remplacement ou de la transformation conceptuelle issue des modèles classiques du changement conceptuel. Pour Potvin (2018), lorsqu'on enregistre un déclenchement du contrôle inhibiteur, il faut alors se demander à quoi il s'oppose au juste. Malheureusement, la grande majorité des modèles de changement conceptuel dits « classiques » que nous avons présenté sont caractérisés par un manque d'intérêt généralisé pour ce qui arrive aux conceptions alternatives des apprenants une fois le changement conceptuel supposé opéré par ces derniers. Or, si une initiative de changement conceptuel basé sur ces modèles avait véritablement réussi, présumément il ne devrait implicitement plus subsister aucune trace de la conception initiale ou alternative visée par le changement, ni de sa forme initiale, dans le cerveau (Potvin et al., 2020). Pourtant, les résultats des études chronométriques mentales et d'imageries cérébrales supra mentionnées confirment bel et bien leur présence dans le cerveau même si le changement a été enregistré comme réussi. Ces résultats qui conçoivent l'apprentissage comme le résultat d'une compétition entre des idées coexistantes ont conduit à l'élaboration de plusieurs autres modèles de changement conceptuel. Parmi ces modèles dits de coexistence nous avons par exemple le modèle d'évitement de l'extinction des idées fausses de Solomon (1983) ; le



modèle de reprise contextuelle de Ohlsson (2009) ; le modèle de médiation conceptuelle de Dawson (2014) ; le modèle des textes réfutationnels de Kendeou et al. (2016) ; le modèle dynamique de changement conceptuel de Nadelson et al. (2018) ; le modèle de prévalence conceptuelle de Potvin (2013, 2018), etc. (Potvin et al., 2020). Mais le plus à jour en matière de changement conceptuel, et qui est applicable au contexte d'apprentissage des sciences, est le modèle de prévalence conceptuelle qui a été développé par une équipe, constituée des neurodidacticiens et des didacticiens des sciences et de la technologie, conduite par Patrice Potvin. C'est la raison pour laquelle ce modèle, sur lequel notre technique de remédiation s'appuie, sera présenté dans le cadre de cette thèse.

#### **4.6. Modèle de prévalence conceptuelle**

L'élaboration du modèle de prévalence conceptuelle s'inscrit dans une perspective où certaines recherches neurodidactiques appliquées au processus d'apprentissage des sciences et de la technologie (Potvin, 2013 ; Potvin et al., 2015 ; Potvin, 2018 ; Potvin et al., 2020 ; Potvin, 2021) ont décidé d'assumer de façon systématique et explicite la coexistence des conceptions. Elles ont ainsi repensé ce processus d'apprentissage comme « *un surpassement de certaines conceptions (désirées) au détriment d'autres, considérées comme en interférence avec les buts pédagogiques identifiés* » (Potvin, 2018, p. 325), au lieu d'un abandon ou d'une transformation prônés par les modèles emblématiques dits classiques. Suivant cette conception du processus d'apprentissage des sciences, la production d'une bonne réponse à une question posée requiert de la part de l'apprenant une mise en œuvre d'une sorte de délibération plus ou moins consciente qui va lui permettre de trancher entre les conceptions contradictoires ou de leurs éléments contradictoires, au cas échéant, qui pourraient se ressembler. Au terme de cette délibération, la conception pertinente ou une des parties de ladite conception doit prévaloir sur les autres, sans pour autant les supprimer ou les remplacer (Potvin, 2018 et Potvin et al., 2020). Dès lors, le changement conceptuel est perçu par Patrice Potvin, l'auteur principal de ce modèle, comme la prévalence nouvelle d'une conception ou partie conceptuelle sur une ou plusieurs autres conceptions existantes dans la pensée (Potvin, 2018).

Dans le modèle de la prévalence conceptuelle, la conception est réduite à la mobilisation de toutes sortes d'objets conceptuels (heuristique, *p-prim*, règle intuitive, catégorie ontologique, conception alternative ou misconception, etc.) susceptibles de détourner l'attention de l'apprenant de la bonne réponse (Potvin, 2018). Suivant cette

perspective, et contrairement aux perspectives transformationnelles et de remplacement conceptuel, la taille (petite ou grande ou encore un fragment) d'une conception n'est plus importante, car elle est considérée comme un tout qui peut avoir n'importe quelle taille et n'importe quelle complexité. Ce réductionnisme permet d'aborder le problème de changement conceptuel de façon opérationnelle et efficace pour faire avancer les apprenants dans leur apprentissage (Potvin, 2018 ; Potvin et al., 2015). En plus des idées de coexistence conceptuelle et des modifications qui sont susceptibles de se produire dans les réponses des apprenants, la crédibilité statutaire (c'est-à-dire le niveau d'adhésion ou d'utilité cognitive qu'on reconnaît à une conception dans tel ou tel contexte) qu'un apprenant accorde à ses conceptions est modulée dans ce modèle. Cette adhésion rend sensibles les statuts des prévalences des conceptions en fonction des conditions qu'imposent les contraintes de la résolution d'un problème, faisant de telle sorte qu'une conception qui prévaudrait dans un contexte, puisse ne pas l'être dans un autre même légèrement différent (Potvin 2018). Ces contraintes ont amené Patrice Potvin à présumer dans le cadre de son modèle que:

*Le statut qu'une personne accorde aux conceptions dont elle dispose pourrait être évalué comme plus élevé lorsque cette personne réussit mieux ou plus souvent les tâches qui s'inscrivent en congruence avec ces conceptions, et plus faible lorsqu'elle échoue plus fréquemment les tâches qui s'inscrivent en contradiction avec elles. (Potvin, 2018, pp. 326-327)*

Autrement dit, pour Patrice Potvin, une conception qui a un statut élevé peut être associée à un plus fort sentiment de certitude de son détenteur et vice-versa, lorsqu'elle a un statut moins élevé. Ce qui implique qu'une décroissance du niveau de certitude conceptuelle ressenti par une personne ou un apprenant pourrait être considérée comme un signe annonciateur des premières phases d'un changement conceptuel (Potvin, 2018). Ainsi, pour ce dernier, la prévalence pourra se produire lorsque l'adhésion à une conception surpassera suffisamment celles des autres conceptions pour se révéler dans la réponse proposée. De cette façon, le changement conceptuel sera plus explicitement une sorte de course entre conceptions rivales, dont la source d'énergie nécessaire pour la tenue de ladite course serait la perception de l'utilité cognitive associé à chacune des idées en rivalités (Potvin, 2018). Toutefois, la course dont il est question ici n'est pas une compétition ordinaire à la fin de laquelle on connaît le vainqueur, elle est sans fin et le vainqueur est toujours provisoirement circonstanciel. Ce qui fait de la prévalence un processus contextuel, momentané et temporairement valable à l'instant où l'on doit agir pour résoudre une situation dont il fait

face (Potvin, 2018) et qui ne sera peut-être plus le cas à l'avenir si la stratégie déployée pour ladite résolution n'est pas ou n'a pas encore été automatisée. À ce sujet Potvin (2018) écrit: « *Toute prévalence pourrait donc n'être que temporairement. La conception qui gagne aujourd'hui est celle qui est en avance aujourd'hui* » (p. 328). D'où la nécessité de soutenir et de renforcer les statuts des conceptions dont on veut faire prévaloir chez les apprenants pour qu'elles ne soient pas seulement des prévalences temporaires qui retombent rapidement une fois que le contexte est modifié.

Pour assurer sa fonction normative liée au processus d'enseignement-apprentissage des sciences et de la technologie, le modèle de prévalence conceptuelle innove en prenant en compte dans son fonctionnement la dynamique psychologique ordinaire des apprenants et de la classe. Bien qu'il ne constitue pas une solution pédagogique intégrale et miracle pour répondre à toutes les attentes et exigences de l'enseignement scientifique (Par exemple non prise en compte de l'origine et de l'analyse d'une conception, manquement d'accompagnement constructivistes, etc. (Potvin, 2018)), ce modèle suppose trois conditions ou étapes non-linéaires à remplir pour qu'un changement conceptuel se réalise :

- commencer une séquence d'enseignement en assurant dès le départ la disponibilité des conceptions expertes (description des modèles scientifiques) que l'on souhaite faire apprendre. Cette étape se justifie par les résultats obtenus dans une recherche expérimentale menée par les élaborateurs de ce modèle en 2015 auprès de 600 élèves qui montrent que commencer une séquence d'enseignement-apprentissage par des conflits cognitifs n'était pas meilleure pour obtenir des améliorations qualitatives des réponses. Surtout pour des élèves qui ont les performances initiales moindres. Cependant, les conflits cognitifs seraient davantage propres à consolider les acquis des apprenants qui sont déjà capables dès le départ de produire les bonnes réponses en recourant aux modèles souhaités. Ceci distingue ce modèle des autres modèles de changement conceptuel qui recommandent plutôt la provocation des conflits cognitifs ou sociocognitifs en lieu et place de cette disponibilité ;
- ensuite, installer les réflexes inhibiteurs qui vont amener les apprenants à reconnaître les circonstances qui nécessitent la résistance à leurs conceptions propres au profil des conceptions expertes apprises à la première étape. D'où la mise sur pied des alertes de vigilance pour faciliter le déclenchement de ces réflexes. Le conflit cognitif intervient explicitement à cette étape pour permettre à l'apprenant de développer ses réflexes inhibiteurs dans le but d'identifier plus rapidement les situations où ses conceptions

initiales ne sont plus applicables. Ces réflexes inhibiteurs vont induire chez l'apprenant, un changement de prévalence conceptuelle en freinant l'augmentation du statut donné aux conceptions non appropriées dans ce contexte (Potvin, 2018 ; Potvin & Cyr, 2017 ; Willame, 2017). L'importance de cette étape se justifie par des nombreuses études de neuroimagerie (Houdé et al., 2000 ; Babai et al., 2015 cité dans Potvin, 2018) qui ont montré que le simple fait d'avertir les apprenants de la présence « des pièges à éviter » dans un exercice lors de sa résolution, déclencherait leur système de vigilance consciente lié à une transition de stratégies de résolutions plus perceptuelles à des stratégies de contrôle ;

- enfin, automatiser l'emploi des modèles scientifiques appris au départ en étendant leur utilisation dans des contextes plus diversifiés. La répétition est centrale à ce niveau. Elle permet à tout moment de remuer les connaissances apprises, étape qui est souvent moins prise en compte dans les modèles classiques de changement conceptuel qui présument la transformation ou le rejet des conceptions initiales. Ces répétitions, qui doivent intervenir de façon régulière et dans des situations opérationnelles variées pour convaincre le cerveau de leur utilité (Dehaene, 2018), doivent porter non seulement sur la conception désirée, mais aussi sur les réflexes inhibiteurs qui installent les alertes de vigilances. Ces alertes vont mettre en garde l'apprenant, qu'il doit rendre prévalente la conception pertinente et inhiber celles qui interfèrent dans le même contexte que celui du conflit cognitif (Willame, 2017). Ces alertes pourront également essayer de pallier le phénomène de l'oubli permanent ou d'affaiblissement de statut conceptuel qui s'opère inconsciemment chez l'homme ou l'apprenant au fil du temps (Potvin, 2018).

D'une manière générale, le modèle de prévalence conceptuelle propose aux acteurs du processus d'enseignement-apprentissage des sciences d'arrêter de combattre directement les conceptions alternatives des apprenants, car les résultats des recherches en neuroéducation montrent qu'elles sont des réalités durables avec lesquelles il faut composer lors des séances d'apprentissage. À cet effet, ce modèle recommande aux acteurs : d'assurer au préalable la disponibilité des conceptions qu'ils désirent faire acquérir et prévaloir chez les apprenants ; d'instaurer chez ces derniers, les réflexes du contrôle inhibiteur qui leur permettent de résister à l'emploi de certaines de leurs conceptions alternatives dans les contextes où elles s'avèrent infructueuses ; et enfin, automatiser ces réflexes et la mobilisation des conceptions

désirées en les étendant davantage dans d'autres contextes similaires pour qu'elles prévalent de manière naturelle même hors du cadre scolaire.

Dans le cadre de cette recherche, pour une meilleure atteinte de notre objectif, qui est celui d'évaluer l'impact d'un apprentissage basé sur le modèle de prévalence conceptuelle sur les difficultés rencontrées par les apprenants camerounais des séries scientifiques de l'enseignement secondaire général lorsqu'ils déterminent la concentration d'une espèce chimique en solution aqueuse, certains paramètres seront rajoutés à ce modèle. Le but visé par ce rajout est celui de faciliter le changement conceptuel en vue d'une meilleure conceptualisation de la concentration d'une espèce chimique en solution et de certaines notions fondamentales (caractère intensif d'une grandeur, la dissolution, la dilution, etc.) nécessaires pour sa compréhension. Il s'agit premièrement, de l'identification préalable des conceptions alternatives, ainsi que leurs origines, qui entravent la construction du concept de concentration d'une espèce chimique en solution. Puis, en fonction des connaissances dont disposent les apprenants suivant leur catégorie typologique de raisonnement, nous allons identifier : ceux ne disposant pas des connaissances préalables (carence conceptuelle) ; ceux qui ont des connaissances conceptuelles correctes, mais incomplètes (agencement incomplet) et ceux qui ont les conceptions alternatives sur la concentration d'une espèce chimique en solution, afin de planifier une remédiation ciblée plus efficace. Deuxièmement, pour rendre disponible le concept de concentration d'une espèce chimique en solution, certains paramètres socioconstructivistes seront pris en compte tels que : la ZPD dans la construction de nos activités d'apprentissage et les interactions sociales dans l'organisation de notre milieu expérimentale (salle de classe). Enfin, les étapes d'installation des réflexes inhibiteurs et d'automatisation seront exécutées sans changement majeur.

## **5. Formulation opérationnelle des questions et hypothèses spécifiques de recherche**

À la lumière de notre cadre conceptuel, nous proposons une formulation opérationnelle des questions spécifiques soulevées par notre recherche qui va comme suit :

- 1- Quelles sont les difficultés rencontrées par les élèves camerounais des classes de séries scientifiques de l'enseignement secondaire général et leurs origines lorsqu'ils sont interrogés sur la concentration d'une espèce chimique en solution ?**
- 2- Quel est l'impact des activités de remédiation basées sur des conceptions prévalentes sur les scores de ces élèves lorsqu'ils sont de nouveau interrogés sur la concentration**

**d'une espèce chimique en solution, comparativement aux activités de remédiation classiques basées uniquement sur le conflit cognitif ?**

Pour répondre à ces questions, les hypothèses opérationnelles spécifiques que nous allons vérifier sur le terrain sont formulées de la manière suivante :

**H1- Les élèves camerounais des classes de séries scientifiques de l'enseignement secondaire général, à travers leurs mécanismes de raisonnement, rencontrent les difficultés d'ordres de carence, ontologique, épistémologique et didactique lorsqu'ils répondent aux questions sur la concentration d'une espèce chimique en solution.**

**H2- Les activités de remédiation basées sur des conceptions prévalentes améliorent significativement les scores des apprenants des classes de séries scientifiques de l'enseignement secondaire général lorsqu'ils sont de nouveau interrogés sur la concentration d'une espèce chimique en solution, comparativement aux activités de remédiation basées uniquement sur le conflit cognitif.**

La présentation de la méthodologie utilisée pour vérifier ces hypothèses fait l'objet du prochain chapitre.

## **PARTIE II : CADRE MÉTHODOLOGIQUE ET OPÉRAIRE**

### **CHAPITRE 3 : MÉTHODE DE LA RECHERCHE**



Dans le présent chapitre, nous avons explicité, dans un premier temps, les motivations qui sous-tendent le type de recherche choisi dans le cadre de notre étude. Dans un second temps, la description de la population de notre étude et de l'outil de collecte des données utilisé est faite, ainsi que les raisons qui ont conduit à leur choix. Par la même occasion, la description des activités de la phase d'expérimentation est aussi faite. Enfin, dans le présent chapitre, la description du déroulement de la collecte et de l'analyse des données est donnée.

### **1. Type de recherche**

En guise de rappel, la présente recherche vise à évaluer l'impact d'un apprentissage basé sur le modèle de prévalence conceptuelle sur les difficultés rencontrées par les apprenants camerounais des séries scientifiques de l'enseignement secondaire général lorsqu'ils déterminent la concentration d'une espèce chimique en solution aqueuse. Pour faire cela, nous allons, dans un premier temps, identifier les difficultés rencontrées par les apprenants et les causes des raisonnements qui conduisent aux réponses erronées qu'ils proposent lorsqu'ils résolvent les situations conceptuellement problématiques impliquant la concentration d'une espèce chimique en solution. Dans un second temps, après avoir subi les différentes activités de remédiation (basées sur la prévalence conceptuelle et sur le conflit cognitif uniquement) que nous avons élaborées, nous allons évaluer leur impact sur les scores des apprenants lorsqu'ils sont de nouveau interrogés sur des questions liées à la concentration d'une espèce chimique en solution. Cela pour voir s'ils ont remis en question leurs propres conceptions et réaliser un changement conceptuel pour faire prévaloir les conceptions pertinentes sur celles non-pertinentes lorsqu'ils construisent ou mobilisent le concept de concentration d'une espèce chimique.

À cet égard, la présente recherche est de type quasi-expérimental. Elle vise, grâce à un test papier-crayon à trois paliers qui sera décrit par la suite, à recueillir les données mixtes (quantitatives et qualitatives). Cette démarche est adoptée parce qu'elle nous permet au niveau du pré-test d'identifier et de catégoriser les difficultés que rencontrent les élèves interrogés ainsi que leurs origines lorsqu'ils déterminent la concentration d'une espèce chimique en solution. En même temps, elle nous permet d'identifier parmi les élèves interrogés ceux qui éprouvent lesdites difficultés et de les assigner au groupe d'intervention et au groupe de comparaison (témoin), afin d'implémenter les différents types de remédiation conçus. Ainsi, tout changement des caractéristiques comportementales, c'est-à-dire toute modification de performances (scores) des apprenants au sein de chaque groupe

après l'intervention (post-test) est présumément attribuable à cette intervention. Chaque changement du score du participant au post-test sera interprété comme le résultat de l'effet produit par l'apprentissage qu'il a subi sur son processus cognitif lorsqu'il conceptualise la concentration d'une espèce chimique en solution.

## 2. Participants

Les participants de la présente recherche sont des élèves du secondaire. Ils sont issus des différentes classes de séries scientifiques, plus précisément des classes de Seconde C (2<sup>de</sup> C), de Première C et D (1<sup>ère</sup> C et D) et de Terminale C et D (T<sup>le</sup> C et D), du second cycle des établissements d'enseignement secondaire général du Cameroun. Âgés entre 15 et 21 ans, soit une moyenne d'âge de 18 ans, ce choix est motivé d'une part par le fait qu'ils ont déjà reçu un enseignement sur la concentration chimique, plus précisément sur la concentration d'une espèce chimique en solution, ou ils l'ont déjà mobilisé dans le cadre de leur apprentissage en chimie dans leur cursus scolaire. D'autre part, ce choix est aussi motivé par notre intention d'identifier globalement les principales difficultés que rencontrent les élèves du secondaire interrogés lorsqu'ils mobilisent ou conceptualisent la concentration d'une espèce chimique en solution quel que soit leur niveau.

### 2.1. Participants du prétest

À la phase du prétest, pour obtenir au moins une puissance statistique de 95 % avec une marge d'erreur de 5 % dans notre projection d'analyses de différentes données recueillies, les résultats des calculs effectués par le logiciel G\*Power<sup>51</sup> nous indiquent qu'il faut recruter au minimum 326 élèves. Pour être largement au-dessus de ce nombre, nous avons donc interrogé 528 participants lors du pré-test. Ils sont sélectionnés dans huit établissements situés dans quatre régions du Cameroun à savoir: l'Adamaoua, l'Est, le Centre et l'Ouest. De façon précise, il s'agit:

- du Lycée de Nkolmesseng, du Complexe scolaire Institut la Référence et du Lycée de Soa situés dans la région du centre. Le Lycée de Nkolmesseng et le Complexe scolaire Institut la Référence sont situés dans l'arrondissement de Yaoundé 5<sup>e</sup> et le Lycée de Soa est situé, à son tour, dans l'arrondissement de Soa, une banlieue de la ville de Yaoundé ;

---

<sup>51</sup> C'est un logiciel développé par les universités de Kiel et Düsseldorf en Allemagne pour estimer la taille de l'échantillon avant de démarrer l'étude scientifique. Il est gratuit sur <http://www.gpower.hhu.de/>

- du Lycée classique de Foumban et du Lycée de Batoukop situés dans la région de l'Ouest. Le Lycée classique de Foumban est situé dans l'arrondissement de Foumban et le Lycée de Batoukop est situé dans les périphéries de l'arrondissement de Bafoussam 1<sup>er</sup> ;
- de l'Institut Bilingue le Levant de Bertoua situé dans la région de l'Est et plus précisément dans l'arrondissement de Bertoua 2<sup>e</sup> ;
- enfin, du Lycée de Tello et du Lycée Bilingue de Bamyanga situés dans la région de l'Adamaoua, plus précisément dans l'arrondissement de Bélel pour le Lycée de Tello et dans l'arrondissement de Ngaoundéré 1<sup>er</sup> pour le Lycée de Bamyanga.

La répartition desdits élèves en fonction des classes est consignée dans le tableau 2.

**Tableau 2**

*Nombre d'élèves recrutés par établissement pour la phase du pré-test*

Etablissements	Classe			Total par établissement
	2 <sup>de</sup> C	1 <sup>ère</sup> C et D	T <sup>le</sup> C et D	
<b>Lycée de Nkolmesseng</b>	40	47	34	121
<b>Complexe scolaire Institut la Référence</b>	22	30	15	67
<b>Lycée de Soa</b>	31	/	/	31
<b>Lycée classique de Foumban</b>	/	60	65	125
<b>Lycée de Batoukop</b>	13	30	15	58
<b>Lycée de Tello</b>	15	08	05	28
<b>Lycée de Bamyanga</b>	15	13	12	40
<b>Institut Bilingue le Levant de Bertoua</b>	24	18	16	58
<b>Total par classe</b>	160	206	162	<b>528</b>

Soient 219 participants dans la région du centre ; 183 participants dans la région de l'Ouest ; 68 participants dans la région de l'Adamaoua et 58 participants dans la région de l'Est.

De façon générale, le choix de ces établissements a été conditionné par la disponibilité et la volonté des enseignants et des élèves à participer à la recherche. Car dans la plupart des cas, les enseignants, du fait de la pression qu'ils ont pour couvrir les différents programmes d'étude dans les classes sollicitées pour l'expérimentation, sont souvent très réticents à participer à la mise en œuvre des projets de recherche comme celui-ci, prétextant qu'ils n'ont pas de temps ou qu'ils sont en retard dans la couverture desdits programmes. De même que certains élèves, surtout quand il s'agit de répondre aux questions qui seront chiffrées, car ne trouvant pas d'intérêt pour leur cursus, étant donné qu'il ne s'agit pas d'une évaluation sommative formelle entrant dans le cadre de leur formation. Pour cela, les élèves interrogés ont été informés que leurs réponses seront analysées dans le cadre d'une recherche scientifique en didactique de la chimie.

La particularité du Lycée de Nkolmesseng, du Complexe scolaire Institut la Référence et du Lycée de Soa dans la région du centre est qu'ils reçoivent les élèves issus de toutes les couches sociales qui viennent des zones urbaines, périurbaines et des campagnes (plus particulièrement pour le Lycée de Soa). Ces élèves viennent également des différentes régions du Cameroun, c'est-à-dire des différentes aires culturelles camerounaises. Ce qui garantit un échantillon plus représentatif et donc les résultats peuvent être généralisables à l'échelle nationale. Toutefois, le fait qu'ils soient nés ou qu'ils soient socialisés, pour la plupart, dans un milieu autre que leur milieu naturel d'origine nous amène à présumer que ces facteurs peuvent, dans une certaine mesure, influencer leurs comportements, leurs conceptions, etc. sur les objets d'enseignement. Or, comme nous l'avons montré au niveau du cadre conceptuel, les difficultés d'apprentissage conceptuel peuvent être d'origine ontologique, car le milieu dans lequel un sujet évolue impacterait vraisemblablement sur le processus de son développement cognitif. C'est la raison pour laquelle pour avoir un échantillon plus diversifié en matière comportementale par exemple, nous avons élargi le recrutement des participants aux autres établissements scolaires situés dans d'autres régions du Cameroun.

Le choix du Lycée classique de Foumban et du Lycée de Batoukop est motivé également par le fait que le Lycée de Foumban reçoit les élèves qui viennent des zones urbaines et périurbaines alors que le Lycée de Batoukop reçoit essentiellement, à son tour,

les élèves qui viennent des campagnes en majorité et une minorité qui vient des zones périurbaines. Contrairement aux élèves des établissements scolaires choisis dans la région du Centre, ceux qui fréquentent le Lycée classique de Foumban et le Lycée de Batoukop vivent, pour une large majorité, dans leur milieu culturel d'origine. De plus, les élèves du Lycée de Batoukop sont en majorité issus de la couche sociale pauvre alors que ceux du Lycée de Foumban sont plutôt issus des couches sociales pauvres et moyennes (majoritairement). Les deux établissements de la région de l'Ouest, ainsi que ceux de la région du centre que nous avons choisis, sont situés dans des zones où les taux d'alphabétisation et de scolarisation sont élevés.

Mais similairement à ces zones, bien que les régions de l'Adamaoua et de l'Est fassent partie des zones définies par l'État camerounais comme zones d'éducation prioritaire du fait de leur faible taux d'alphabétisation et de scolarisation, les établissements que nous avons choisis dans ces deux régions font plutôt partie des zones qui ont un niveau de scolarisation et d'alphabétisation relativement élevé. L'Institut Bilingue le Levant de Bertoua dans la région de l'Est reçoit lui aussi les élèves qui viennent des zones urbaines, périurbaines et des campagnes ainsi que le Lycée Bilingue de Bamyanga dans la région de l'Adamaoua. Les élèves de ces deux établissements sont issus de la couche sociale moyenne pour la plupart, contrairement à ceux du Lycée de Tello qui sont issus de la couche sociale, essentiellement pauvre provenant, dans la quasi-totalité, des campagnes. Enfin, tous comme les élèves des établissements de la région de l'Ouest sélectionnés, la plupart des élèves sélectionnés dans les régions de l'Adamaoua et de l'Est vivent également dans leur milieu culturel d'origine.

## **2.2. Participants de la phase d'implantation des différents types de remédiation et du post-test**

Après analyse des résultats du pré-test, les apprenants qui échouaient au moins à six questions sur les sept questions centrées sur la détermination de la concentration d'une espèce chimique en solution (moyenne  $\leq$  à 6/7) ont été éligibles pour participer aux deux types de remédiation de la phase d'expérimentation. Plus concrètement, ils ont été soumis à deux séquences d'enseignement-apprentissage du concept de concentration chimique (plus précisément la concentration d'une espèce chimique en solution) dont l'une repose sur un apprentissage habituel basé uniquement sur le conflit cognitif (groupe témoin) et l'autre sur un apprentissage basé sur la prévalence conceptuelle (groupe d'intervention ou expérimental). Parmi les questions échouées, au minimum cinq d'entre elles doivent être

liées aux conceptions alternatives qu'ont les interrogés sur le concept de concentration d'une espèce chimique en solution et les notions élémentaires nécessaires pour son acquisition. En plus de ces critères, nous projetions également pour cette phase atteindre une puissance statistique de 95 % dans les analyses des données du post-test. Ainsi, les résultats des calculs effectués par le logiciel G\*Power nous indiquent qu'il faut recruter au minimum 96 participants.

Selon ces critères, 120 apprenants de niveau Seconde C et de niveau Première C et D venant du Lycée de Nkolmesseng, du Complexe scolaire Institut la Référence, du Lycée de Tello et du Lycée classique de Fouban ont été retenus pour la suite de l'expérimentation. Leur choix a été également conditionné par la disponibilité et la volonté des enseignants et des élèves à participer à la recherche. Ces derniers ont été divisés en deux groupes. Un groupe témoin constitué de 60 apprenants qui ont subi un apprentissage habituel basé uniquement sur le conflit cognitif et un groupe expérimental constitué également de 60 apprenants qui ont subi un apprentissage basé sur la prévalence conceptuelle à leur tour. Chaque groupe comporte autant des filles que des garçons et la distribution des apprenants à chacun des groupes s'est faite au hasard.

La répartition desdits participants recrutés dans ces différents établissements en fonction des classes pour la phase d'implantation des différents types de remédiation et du post-test est consignée dans le tableau 3.

**Tableau 3**

*Nombre d'élèves recrutés par classe et par groupe pour la phase d'implantation des différents types de remédiation et du post-test.*

Etablissements	Classes		Groupes	
	2 <sup>de</sup> C	1 <sup>ère</sup> C et D	Groupe témoin	Groupe expérimental
<b>Lycée de Nkolmesseng</b>	20	29	/	49
<b>Complexe scolaire Institut la Référence</b>	15	10	25	/
<b>Lycée classique de Foumban</b>	/	35	35	/
<b>Lycée de Tello</b>	6	5	/	11
<b>Total par classe et par groupe</b>	41	79	<b>60</b>	<b>60</b>

### 3. Méthode de collecte des données

Dans cette partie, il s'agit de présenter les méthodes de collecte des données de la phase du prétest et de la phase du post-test. Pour faire cela, nous allons commencer par présenter la méthode de collecte des données de la phase du prétest et terminer par celle de collecte des données du post-test.

#### 3.1. Méthode de collecte des données du prétest

Les données issues du pré-test relatives aux difficultés rencontrées par les élèves lorsqu'ils sont interrogés sur des questions liées à la concentration d'une espèce chimique en solution, ainsi que sur les concepts élémentaires qui organisent son apprentissage ont été recueillies au courant du mois de janvier 2020 à l'aide d'un questionnaire. Ce questionnaire leur est adressé directement par leurs enseignants de chimie à leurs heures de cours respectives dans les classes de séries C et D des différents niveaux concernés par l'étude (seconde, première et terminale). Il est conçu sous forme de tests papier-crayon à trois paliers

ou niveaux, de telle sorte qu'ils puissent répondre aux différentes questions que ce dernier comporte en opérant à chaque fois au premier niveau, un choix parmi les réponses qui leur sont proposées pour chacune des questions. Par la suite, au deuxième niveau, ils doivent justifier ou exprimer librement le raisonnement qui a conduit au choix fait au premier niveau. Enfin, ils doivent indiquer au troisième niveau, le degré de confiance qu'ils accordent à leurs choix ainsi qu'à leurs justifications. Pour ce faire, ils disposaient de 50 min au maximum pour répondre aux huit questions du questionnaire. Ils doivent eux-mêmes lire et répondre directement par écrit sur les feuilles du questionnaire.

### **3.1.1. Justification du choix de l'outil de collecte de données**

Rappelons que la présente recherche s'inscrit globalement dans le cadre du changement conceptuel. Dans la partie théorique, plusieurs études didactiques que nous avons présentées ont montré que les difficultés d'apprentissage conceptuel en sciences physiques et plus particulièrement en chimie peuvent être liées aux conceptions alternatives présentes dans la mémoire à long terme de l'apprenant. La conception alternative a été retenue pour désigner les idées fausses d'un apprenant sur un objet d'apprentissage, car nous avons défini une conception comme une représentation mentale ou une idée qu'une personne a vis-à-vis du fonctionnement des choses et qui sous-tend sa compréhension du monde. Bien entendu que cette idée peut être pertinente dans un contexte et non-pertinente dans un autre contexte. Nous avons aussi montré dans la partie théorique que les difficultés d'apprentissage peuvent également être liées aux carences conceptuelles, aux mauvais agencements conceptuels ou aux fragmentations conceptuelles, au niveau du développement cognitif de l'apprenant, etc.

De ce fait, pour qu'une remédiation soit plus efficace, rappelons que Taber (2001) et Cormier (2014) suggèrent de remédier différemment aux difficultés liées aux conceptions alternatives et aux difficultés liées aux carences conceptuelles ou aux mauvais agencements conceptuels ou aux fragmentations conceptuelles, comme il a été aussi montré dans la partie théorique de la présente étude. Car la remédiation des difficultés liées aux carences, aux fragmentations et aux mauvaises coordinations conceptuelles nécessite souvent des interventions pédagogiques moins lourdes à mener en classe. Par exemple, si les difficultés identifiées lors de l'apprentissage d'un concept sont liées spécifiquement aux carences conceptuelles, cela traduit une absence de l'apprentissage. Par conséquent, leur remédiation ne doit pas viser un changement conceptuel, car selon Cormier (2014), il semble



n'y avoir pas des conceptions alternatives présentes dans la mémoire de l'apprenant, mais plutôt l'absence des connaissances conceptuelles. Par contre, la remédiation des difficultés liées aux conceptions alternatives nécessite plutôt le développement des dispositifs didactiques qui doivent favoriser le changement conceptuel. Dans le contexte de notre étude, ce changement va consister à favoriser une sorte de course compétitive entre les idées rivales. En fonction de l'utilité cognitive perçue de chacune de ces idées rivales, si la valeur prédictive ou explicative d'une idée est soudainement reconnue pertinente dans un contexte donné par celui qui le possède, son statut connaîtra pour ce contexte un gain de valeur : c'est la prévalence conceptuelle (Potvin, 2018).

Ainsi, pour optimiser l'efficacité des différents types de remédiation que nous proposons dans la présente étude, nous devons développer un outil de diagnostic des difficultés que les apprenants éprouvent lorsqu'ils déterminent la concentration d'une espèce chimique en solution qui permet autant de les catégoriser en fonction de leurs causes. Cela dans le but de différencier les apprenants qui éprouvent des difficultés liées aux conceptions alternatives de ceux qui éprouvent les difficultés liées plutôt aux carences, aux mauvaises coordinations ou aux fragmentations conceptuelles, avant de procéder aux dites remédiations. D'où le choix et le développement d'un test à trois niveaux pour collecter nos données.

Les tests à trois niveaux ou paliers ont été développés sur la base des études menées sur le développement des outils de collectes de données dans le cadre des recherches en didactiques des sciences. À ce sujet, Kaltakci Gurel et al. (2015) ont analysé et comparé les instruments de diagnostic des conceptions des apprenants développés et utilisés dans 273 articles publiés en didactique des sciences entre 1980 et 2014. Il ressort de cette analyse que les outils de diagnostic des conceptions des apprenants les plus couramment utilisés sont les guides d'entretien (53 %) suivi des questionnaires. En ce qui concerne les questionnaires, les tests ouverts (34 %) et les tests à choix multiples classiques (32 %) sont les plus utilisés comparativement aux tests à plusieurs niveaux (13 %).

Cependant, plusieurs autres recherches en didactiques des sciences ont montré que les conceptions alternatives des apprenants sur des concepts scientifiques et leurs origines ne peuvent pas être entièrement identifiées par des instruments simples tels que : les tests à choix multiples classiques, les tests à réponses ouvertes, l'utilisation de la carte conceptuelle,

les guides d'entretiens, etc. (Chandrasegaran et al., 2007 ; Habiddin & Mary, 2019 ; Tamir, 1971 ; Treagust, 1988 ; Tsai & Chou, 2002).

D'après Treagust (1988) ; Chandrasegaran et al. (2007) et Kaltakci Gurel et al. (2015), bien que les entrevues jouent un rôle crucial dans l'étude des conceptions des apprenants et leurs origines en raison de la possibilité d'examiner en profondeur les structures cognitives qui sous-tendent le raisonnement d'un apprenant, il faut beaucoup de temps pour interroger un grand nombre de personnes afin de recueillir les données qui permettent de généraliser les résultats obtenus. De plus, au cours de l'entretien, les préjugés de l'intervieweur peuvent influencer les résultats et l'analyse des données est un peu difficile et fastidieuse aussi. De même, l'utilisation de la carte conceptuelle exige que les élèves soient capables de maîtriser le vocabulaire dans l'ordre afin d'exprimer leurs idées de manière logique. Pareillement, l'utilisation des questions ouvertes, bien qu'elle permet à l'apprenant de mieux réfléchir afin d'élaborer sa réponse, n'est malheureusement réalisable qu'avec des échantillons réduits limitant ainsi la généralisation des résultats à l'ensemble de la population-cible.

Toutefois, il ressort aussi de ces différentes recherches supra mentionnées que les tests à choix multiples classiques font partie des instruments papier-crayons de collecte des données les plus utilisés et les plus appréciés par les enseignants de sciences et les chercheurs en didactique des sciences. Ils sont faciles à noter et à administrer. Ils permettent aux enseignants et aux chercheurs d'évaluer efficacement la compréhension des élèves ou leurs idées fausses sur les concepts scientifiques qu'on veut leur faire acquérir, afin de mieux planifier leur remédiation à l'aide des approches pédagogiques appropriées. Les tests à choix multiples permettent aussi de couvrir un large éventail de sujets en un temps relativement court, comparativement à d'autres méthodes que nous avons supra mentionnées. Ils sont objectifs en termes de notation et donc plus fiables. Ils sont également bons pour les étudiants qui connaissent leur sujet, mais ont une mauvaise main d'écriture. Ces paramètres font des tests à choix multiples des alternatives viables aux entretiens et d'autres outils qualitatifs pour évaluer la compréhension des élèves ou pour déterminer la prévalence et la distribution des idées fausses dans une population.

Cependant, l'utilisation des tests à choix multiples simples pour étudier les conceptions des apprenants présente aussi certaines faiblesses parmi lesquelles nous pouvons citer: le choix de réponses par les élèves basé généralement sur le hasard ; le manque d'informations plus pertinentes sur le mode de raisonnements qui conduit au choix

de réponses que les élèves opèrent ; ils ne laissent pas le libre choix aux apprenants d'élaborer leurs réponses, mais les obligent plutôt de choisir chaque réponse parmi celles que le test propose ; etc. Par conséquent, les tests à choix multiples simples ne peuvent pas différencier les réponses dues à un raisonnement correct de celles qui sont dues à un raisonnement incorrect ou à un hasard (Habiddin & Mary, 2019 ; Kaltakci Gurel et al, 2015). Autrement dit, ces outils de collecte de données unidimensionnels ne peuvent pas faire la distinction entre les apprenants en manque de connaissances et ceux qui ont des conceptions alternatives sur un concept. Ces faiblesses des questionnaires à choix multiples simples ont poussé plusieurs chercheurs dans le domaine de la didactique des sciences (Chandrasegaran, et al., 2007 ; Habiddin & Mary, 2019 ; Tamir, 1971 ; Treagust, 1988 ; Tsai & Chou, 2002) à élaborer et tester d'autres questionnaires ou instruments à plusieurs niveaux pour étudier les conceptions des apprenants.

Les questionnaires à choix multiples à plusieurs niveaux innovent par le fait qu'ils permettent à la fois d'identifier les difficultés des apprenants et leurs origines à travers le raisonnement que ces derniers proposent pour justifier leurs choix. Parmi eux, nous avons les tests à l'aide d'items à choix multiples à deux paliers développés principalement par Treagust (1988). Ils sont les plus utilisés en didactique de la chimie. Le premier niveau est constitué des questions à choix multiples avec une seule réponse juste et des réponses distrayantes. Parmi les réponses distrayantes, l'on doit y retrouver celles qui tiennent compte des conceptions alternatives des apprenants déjà identifiées dans d'autres études semblables ou par une étude préliminaire et celles qui peuvent être attribuées à un manque de connaissances. Le deuxième niveau est réservé aux raisonnements où l'interrogé doit justifier le choix de la réponse qu'il a opérée au premier niveau pour permettre au chercheur de déceler le type de raisonnements qui sous-tend ce choix. Ce niveau peut être présenté sous deux formes. Une première qui consiste à présenter à l'enquêté, comme au premier palier, plusieurs modes de raisonnements au choix. Et parmi ces raisonnements, un doit être scientifiquement correct et les autres raisonnements doivent être des conceptions alternatives des apprenants déterminées par les tests préliminaires, des entretiens, les questions ouvertes ou dans la littérature. Une deuxième qui est plutôt ouverte pour laisser l'enquêté exprimer librement sa pensée ou son raisonnement. Cette dernière forme est difficile à dépouiller, mais très révélateur des raisonnements qui conduisent aux réponses fournies par les enquêtés et peut bien remplacer les questions d'entrevue (Chandrasegaran et al., 2007).

Plus spécifiquement, les tests à deux niveaux ont été largement utilisés dans les études des compréhensions des apprenants sur certains concepts chimiques comme la liaison chimique, l'équilibre chimique, la molécule, la polarité, la cinétique chimique, etc. (Chandrasegaran et al., 2007 ; Cormier, 2014 ; Habiddin & Mary, 2019 ; Kaltakci Gurel et al., 2015 ; Şen & Yilmaz, 2017). Malheureusement, dans la plupart de ces recherches, le deuxième niveau du test qui devrait donner la possibilité à l'apprenant d'exprimer librement le raisonnement qui a guidé son choix de réponse au premier niveau n'est pas à réponse ouverte, mais plutôt à choix multiple. Cela ne donne pas la possibilité à l'apprenant d'exprimer librement sa pensée. Une des conséquences majeures est que dans la plupart des cas, c'est présumément le hasard qui guide le choix des élèves au deuxième palier pour justifier leur choix au premier palier. Ce qui ne permet pas toujours aux chercheurs ou aux enseignants de faire une différence nette entre un manque de connaissances, une mauvaise coordination des connaissances scientifiques dans le raisonnement et la présence d'une conception alternative dans les modèles mentaux des apprenants (Habiddin & Mary, 2019). Pour pallier à ces difficultés, les tests à trois et à quatre niveaux ont été développés.

Dans les tests à trois niveaux, en plus de deux premiers niveaux du questionnaire à deux paliers, un troisième niveau est ajouté. Il s'agit d'une échelle demandant le niveau de confiance que les apprenants accordent à leurs réponses aux deux premiers niveaux comme l'indique la figure 28.

**Figure 28**

*Exemple d'item d'un test à trois paliers proposé par Şen et Yilmaz (2017, p. 114) pour étudier la compréhension conceptuelle des élèves du secondaire sur le concept de liaison chimique.*

**1a) In which of the following is a change observed during the transition of pure ice from solid phase into liquid phase?**

**\*A) The strength of hydrogen bonds between molecules**

**B) Sigma ( $\sigma$ ) bond gravity force in the molecule**

**C) Attractive forces of the covalent bond in the molecule**

**D) The number of sigma ( $\sigma$ ) bonds in the molecule.**

**1b) Which of the following best explains your reason for your answer?**

**A) Hydrogen bonds between molecules are not chemical bonds but are only forces/interactions.**

**B) Sigma bonds are not real chemical bonds but are only weak forces.**

**\*C) Molecules that have more kinetic energy while ice is melting begin to separate, and hydrogen bonds are preserved to some extent.**

**D) The attractive forces of covalent bonds need to decrease in order for molecules having more kinetic energy to separate, while ice melting.**

**1c) About the answer to the above question:**

**a. I am sure.**

**b. I am not sure.**

**\* Correct answer.**

Mais, dans la plupart des recherches qui utilisent les tests à trois paliers pour sonder la compréhension conceptuelle des apprenants comme c'est le cas dans l'exemple de la figure 28 ci-dessus, tous les trois paliers sont des propositions à choix multiples. Au premier palier de l'exemple précédent, les apprenants doivent opérer un choix parmi plusieurs options de réponses où seule l'option A est la bonne réponse à la question qui est posée. Au deuxième palier où les apprenants doivent justifier les réponses qu'ils ont proposées au premier palier, ces derniers doivent également opérer un choix parmi plusieurs propositions où seule l'option C est correcte. Enfin, au troisième palier, les apprenants sont invités à indiquer s'ils étaient sûrs ou non de leurs réponses. Ainsi, les réponses des apprenants sont considérées comme correctes lorsqu'ils répondent correctement aux premier et deuxième niveaux et ils sont sûrs de leurs réponses. De même, les réponses des apprenants sont considérées comme fausses lorsqu'un mauvais choix de réponse au premier palier est accompagné d'un mauvais choix de raison (raisonnement lié à la réponse choisie) au deuxième palier et en déclarant au

troisième niveau qu'ils sont sûrs de leurs réponses (Habiddin & Mary, 2019 ; Kaltakci Gurel et al., 2015 ; Şen & Yilmaz, 2017).

Les tests à trois niveaux ont aussi l'avantage de discriminer les apprenants en manque de connaissances ou les apprenants qui agencent mal les concepts appris lors de la résolution des tâches qui les impliquent, de ceux qui ont les conceptions non scientifiques ou alternatives face à un concept. Car Cormier (2014) et bien d'autres chercheurs du domaine (voir cadre conceptuel) nous font comprendre que les mauvaises réponses proposées par les apprenants ne proviennent pas toutes des conceptions alternatives. Elles peuvent également provenir d'un manque de connaissances ou d'un mauvais agencement conceptuel. Par exemple, les apprenants seront en manque de connaissances si ces derniers répondent de façon incorrecte au premier et/ou au deuxième niveau et ils déclarent qu'ils ne sont pas sûrs de leurs réponses (Şen & Yilmaz, 2017). D'autres combinaisons, en fonction de ce que la recherche vise, sont également possibles. Par exemple, les erreurs commises par les apprenants sont considérées comme des erreurs positives lorsqu'ils répondent correctement au premier palier, mais incorrectement au deuxième palier (en proposant ou en choisissant un raisonnement incorrect) et en déclarant aussi au troisième palier qu'ils sont sûrs de leurs réponses (Şen & Yilmaz, 2017). Dans ce cas précis, si le deuxième palier est ouvert, nous pouvons, à travers les justifications proposées par les apprenants, présumer un mauvais agencement conceptuel par ces derniers en examinant s'ils mobilisent dans leurs raisonnements, bien qu'ils soient incorrects, les concepts appris. De même, les erreurs commises par les apprenants sont considérées comme négatives lorsqu'ils répondent incorrectement au premier niveau, mais correctement au deuxième niveau et ils déclarent au troisième niveau qu'ils sont sûrs de leurs réponses (Şen & Yilmaz, 2017). Il peut s'agir dans ce cas spécifique des erreurs d'inattention, de concentration, de conversion des unités de mesure, de manipulation des formules, etc. ne relevant pas directement du champ disciplinaire du concept (Willame, 2017).

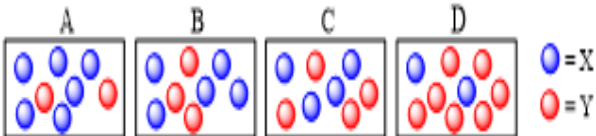
Mais les tests à trois niveaux peuvent dans une certaine mesure présenter quelques limites. Par exemple, lorsque le deuxième palier est à choix multiple comme le premier palier et le niveau de confiance est exprimé pour les deux niveaux (réponses et raisonnements), la différenciation des apprenants en manque de connaissances de ceux qui agencent mal les connaissances acquises face à un concept devient également un peu plus complexe. C'est l'une des raisons pour lesquelles les tests à quatre niveaux ont été

développés par les chercheurs. Ils diffèrent de ceux à trois niveaux par le fait que les apprenants interrogés expriment indépendamment le niveau de confiance qu'ils accordent à chacune des réponses choisies au premier palier et le niveau de confiance qu'ils accordent à chacune de leurs justifications au deuxième palier comme l'illustre l'extrait de la figure 29.

**Figure 29**

*Exemple d'item d'un test à quatre paliers proposé en cinétique chimique par Habiddin et Mary (2019, p.724)*

For a hypothetical reaction:  $X + Y \rightarrow \text{Products}$ , the rate of reaction is second order with respect to X but first order with respect to Y. Four experiments are carried out with different starting concentrations represented pictorially below in the boxes A, B, C and D. Which of the starting conditions (A, B, C or D) will result in the highest rate of reaction?



State the confidence rating of your answer

1. Very unconfident      2. Not very confident      3. Average      4. Quite confident      5. Very confident

Which one of the following options is the reason for your answer to the question?

A. It has the highest concentration of the reactant which is 2<sup>nd</sup> order  
 B. The concentrations of both reactants are the same, therefore the ratio of collision is more favorable  
 C. The amount of X and Y and the average of each keep determine the rate  
 D. The concentration of Y is much higher than the concentration of X and this leads to the reaction being completed faster

State the confidence rating of your answer

1. Very unconfident      2. Not very confident      3. Average      4. Quite confident      5. Very confident

Malheureusement, tout comme les entretiens et les questions ouvertes, leur dépouillement exige beaucoup de temps et l'analyse des données est aussi fastidieuse dans ce cas.

Compte tenu de ce qui précède, rappelons que nous avons opté pour un questionnaire constitué des questions à trois paliers dans le cadre de la présente recherche. Lors de l'élaboration desdites questions, nous pensons qu'il est important de laisser le deuxième palier ouvert pour permettre à l'apprenant d'exprimer librement sa pensée. Cela permettra d'évaluer les difficultés des élèves lorsqu'ils conceptualisent ou mobilisent la concentration d'une espèce chimique de façon plus valable et plus fiable. Cela permettra également d'identifier dans les raisonnements qui conduisent aux réponses fausses proposées par les apprenants, ceux qui sont liés à un manque de connaissances, ceux qui sont liés à un mauvais

agencent conceptuel et ceux qui sont liés aux conceptions alternatives. De plus, même si les questionnaires ou les tests à trois niveaux ont déjà été utilisés pour étudier la compréhension conceptuelle des apprenants sur certains concepts de chimie, ils n'ont pas encore été utilisés pour le même but en ce qui concerne la concentration chimique quels que soient les niveaux des apprenants à notre connaissance.

### **3.1.2. Élaboration et validité du questionnaire**

Le questionnaire que nous avons élaboré est constitué de huit questions. Parmi ces questions, sept (Q1 jusqu'à Q7) sont centrées sur la concentration d'une espèce chimique (ion ou molécule) en solution et les notions élémentaires pivots qui sont nécessaires pour sa conceptualisation (la dissolution, la dilution, la proportionnalité et l'intensivité de la grandeur concentration chimique). Ces questions sont présentées aux apprenants, soit sous la forme littérale (Q2, Q3, Q5, Q6 et Q7), soit en utilisant les représentations iconographiques qui modélisent les particules de soluté (ions) dans la solution (Q1 et Q4). L'utilisation de la représentation iconographique des espèces ioniques en solution a été choisie pour évaluer la capacité conceptuelle des élèves à comprendre et à interpréter les phénomènes microscopiques liés à la dissolution des solides ioniques dans l'eau afin de calculer les concentrations des espèces ioniques qui se forment dans la solution obtenue. Car selon De Berg (2012), la représentation microscopique des phénomènes chimiques au niveau atomique et moléculaire est plus susceptible d'améliorer la résolution de problèmes conceptuels plutôt qu'algorithmiques chez les étudiants de niveau universitaire. Nous avons donc jugé nécessaire de vérifier si cette conclusion est valable lorsqu'il est demandé aux apprenants de niveau secondaire de calculer les concentrations des espèces ioniques en solution à partir de leur représentation iconographique. Puisque Ayina Bouni (2013) présume, à son tour, que la schématisation iconographique d'un phénomène chimique constitue une aide précieuse dans la conduite d'un raisonnement logique par l'apprenant.

Excepté la huitième question, chacune des sept autres questions est originale. Elles sont élaborées à partir des conceptions répertoriées dans les écrits scientifiques, et de notre expérience d'enseignement en chimie. Le premier palier de chacune de ces sept questions propose plusieurs réponses aux choix parmi lesquelles une seule réponse est juste et les autres sont des réponses distractrices. Le deuxième palier de chacune d'elles est ouvert pour laisser la latitude à chaque participant d'exprimer librement le raisonnement qui a guidé le choix qu'il a opéré au premier palier. Enfin, le troisième palier permet à chaque participant

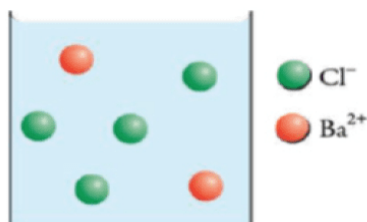


de signifier s'il est sûr ou pas de ses réponses. En plus du niveau de confiance que les apprenants accorderont à leurs réponses, les raisonnements qu'ils proposeront aussi au deuxième palier de chaque question vont jouer un rôle très important dans cette recherche. Car les combinaisons des réponses des trois paliers que nous présenterons dans la partie suivante vont nous permettre de distinguer les apprenants qui manifestent un manque de connaissances conceptuelles de ceux qui agencent mal les concepts appris ou qui ont les conceptions alternatives. Cela lorsqu'ils mobilisent la concentration d'une espèce chimique en solution ainsi que les notions pivots qui organisent son apprentissage pour répondre de façon erronée aux questions qui les impliquent. Un exemple des questions incluent dans le questionnaire de la présente recherche est présenté par la figure 30.

### Figure 30

*Exemple de question à trois paliers élaborée dans le cadre de la présente recherche*

Q1) Le schéma ci-dessous représente une solution aqueuse constituée d'ions chlorures ( $\text{Cl}^-$ ) et d'ions baryums ( $\text{Ba}^{2+}$ ). Le volume de la solution est  $V = 0,20 \text{ L}$ .



1.1) Quelles sont les concentrations (en mol/L) des ions présents dans cette solution ? Considérez que chaque sphère représente 0,10 mol de l'ion en solution.	a) $[\text{Cl}^-] = 0,50 \text{ mol/L}$ et $[\text{Ba}^{2+}] = 0,50 \text{ mol/L}$ b) $[\text{Cl}^-] = 2 \text{ mol/L}$ et $[\text{Ba}^{2+}] = 1 \text{ mol/L}$ c) $[\text{Cl}^-] = 0,4 \text{ mol/L}$ et $[\text{Ba}^{2+}] = 0,2 \text{ mol/L}$ d) $[\text{Cl}^-] = 4 \text{ mol/L}$ et $[\text{Ba}^{2+}] = 2 \text{ mol/L}$ e) Autre réponse à préciser.....
1.2) Justifier votre réponse :	
1.3) Confiance accordée à votre réponse :	a) Sûre b) Pas sûre

La huitième question (Q8) quant à elle est simple et vise à identifier les sources des connaissances que les élèves ont utilisées pour répondre au questionnaire. Elle est inspirée de la recherche d'Ouasri et Ravanis (2020) lorsqu'ils ont analysé les difficultés des élèves marocains (14-16 ans) de troisième année de secondaire collégial à propos de l'apprentissage du concept d'ion en lien avec les notions pivots (atome, molécule, électron, charge) qui organisent son apprentissage.

Dans l'élaboration dudit questionnaire, nous avons choisi de limiter le nombre de questions pour donner le temps aux participants de bien justifier leurs réponses. Car lorsque nous avons examiné plusieurs recherches similaires à la nôtre – plus particulièrement celle qui a été conduite en Malaisie par Sheau Huey et al., (2019) visant à identifier les conceptions alternatives des étudiants ainsi que les difficultés qu'ils rencontrent lors de la résolution des problèmes sur les concepts de mole et la concentration de la solution – nous avons fait certains constats. Premièrement, le nombre de questions était supérieur à vingt. Deuxièmement, les questions centrées sur un des objets de leur recherche, à savoir la concentration chimique, étaient placées à la fin du questionnaire. Par conséquent, aucune conclusion n'a été tirée sur la plupart de ces questions, car plus de 65 % des étudiants interrogés n'avaient pas répondu à ces questions. Et lorsque ces chercheurs les ont interviewés pour comprendre la cause, ils ont constaté que plus de trois-quarts ont déclaré qu'ils étaient fatigués et c'est la raison pour laquelle ils n'ont pas répondu à ces questions.

Dans ce questionnaire, nous avons aussi tenu compte du fait qu'il est nécessaire pour les apprenants d'avoir des connaissances conceptuelles profondes et qualitatives qui vont au-delà du simple maniement des formules et des nombres pour répondre aux différentes questions. Parce que plusieurs études antérieures en didactique de la chimie portant sur le concept de la concentration chimique que nous avons présentées dans la problématique montrent que les apprenants ont des difficultés conceptuelles sur la notion de la concentration chimique, même après son enseignement, malgré le fait qu'ils peuvent répondre correctement aux questions dans les exercices numériques. C'est la raison pour laquelle les questions de notre questionnaire abordent plusieurs aspects conceptuels clés liés à la concentration d'un ion ou d'une molécule en solution que l'apprenant doit maîtriser pour mieux conceptualiser le concept de la concentration chimique. Parmi ces aspects conceptuels, nous avons :

- la dissolution et la solution homogène, pour lesquelles les élèves doivent avoir conceptualisé que les particules de soluté (ion ou molécule) ne disparaissent pas dans

- la solution après la dissolution d'un soluté dans un solvant, mais sont plutôt uniformément réparties dans un volume considéré de solution (toutes les questions du questionnaire) ;
- la proportionnalité de la grandeur concentration chimique où les apprenants doivent avoir acquis que la concentration d'une solution ou d'une espèce chimique en solution (ion ou molécule) est le rapport entre la quantité de matière contenue dans cette solution ou de chaque espèce chimique en solution et le volume de la solution (toutes les questions) ;
  - le caractère intensif de la grandeur concentration chimique, car ils doivent aussi avoir conceptualisé que la concentration d'un ion ou d'une molécule est une grandeur intensive qui ne dépend pas de la quantité de solution considérée, mais plutôt de deux grandeurs extensives qui sont la quantité de matière  $n$  et le volume  $V$  de la solution (Q2, Q5, Q6 et Q7). Les apprenants doivent connaître que la concentration chimique ne varie pas dans des processus tels que le transfert d'une partie de la solution ou de toute la solution dans d'autres récipients avec une autre forme (Q7) et l'ajout ou l'addition d'un volume ou de plusieurs volumes de même concentration (Q5 et Q6) ;
  - la dilution. Les apprenants sont supposés savoir que la concentration chimique ou d'une espèce chimique en solution diminue avec l'ajout de plus de solvant à quantité constante de soluté (Q4).

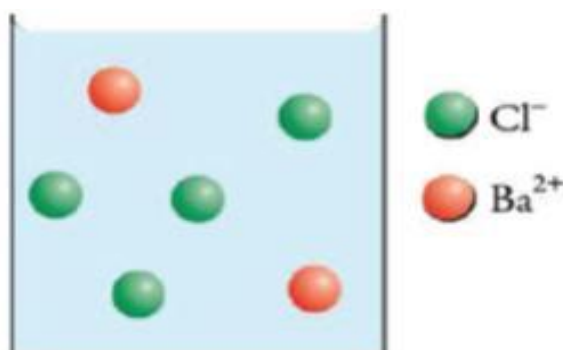
Lorsque nous avons terminé la conception du questionnaire, il a été évalué par trois enseignants expérimentés de la chimie au secondaire ayant chacun au moins 10 ans de service et titulaire d'un Master en didactique de la chimie en plus de leur diplôme de qualification. Il a également été évalué par deux professeurs d'université experts en chimie. Cela dans le but de s'assurer que toutes les questions essentielles à l'atteinte de nos objectifs ont été posées et bien formulées, et que les réponses proposées étaient aussi suffisamment claires. C'est à la suite de ces évaluations que le questionnaire a reçu sa forme définitive comportant environ 4 pages où les unités ont été harmonisées : en litre (L) pour le volume, en mole (mol) pour la quantité de matière et en gramme (g) pour la masse. En plus, toutes les masses molaires moléculaires, dans les questions qui nécessitaient son utilisation, ont été calculées et exprimées en g/mol pour limiter certaines erreurs liées à la conversion des unités et au maniement de certaines formules qui ne relèvent pas directement de la conceptualisation de la concentration d'une espèce chimique en solution, mais plutôt d'un mauvais usage des outils mathématiques. Pour sa validation finale, il a été soumis à 12 élèves

(5 de la classe de seconde C et 7 des classes de première C et D) qui ne participaient pas à l'enquête. Cela pour nous rassurer également que la formulation des questions ne posait pas de problème de compréhension chez les apprenants et que les 30 min accordées sont suffisantes pour répondre à toutes les questions. À la suite de cette validation, certaines questions ont été révisées en fonction des commentaires des élèves lorsqu'ils étaient jugés comme pertinents et le temps définitif pour répondre au questionnaire arrêté à 50 min comme nous avons mentionné au départ.

### 3.1.3- Analyse a priori du questionnaire

#### ➤ Analyse de la première question (Q1)

La première question Q1 est centrée sur la détermination des concentrations des ions dans une solution obtenue en dissolvant un solide ionique dans l'eau. Elle va comme suit : « Le schéma ci-dessous représente une solution aqueuse constituée d'ions chlorures ( $\text{Cl}^-$ ) et d'ions baryums ( $\text{Ba}^{2+}$ ). Le volume de la solution est de 0,20 L.



<p>1.1) Quelles sont les concentrations (en mol/L) des ions dans cette solution ? Considérez que chaque sphère représente 0,10 mol de l'ion en solution.</p>	<p>a) <math>[\text{Cl}^-] = 0,50 \text{ mol/L}</math> et <math>[\text{Ba}^{2+}] = 0,50 \text{ mol/L}</math>  b) <math>[\text{Cl}^-] = 2 \text{ mol/L}</math> et <math>[\text{Ba}^{2+}] = 1 \text{ mol/L}</math>  c) <math>[\text{Cl}^-] = 0,4 \text{ mol/L}</math> et <math>[\text{Ba}^{2+}] = 0,2 \text{ mol/L}</math>  d) <math>[\text{Cl}^-] = 4 \text{ mol/L}</math> et <math>[\text{Ba}^{2+}] = 2 \text{ mol/L}</math>  e) Autre réponse à préciser.....</p>
<p>1.2) Justifier votre réponse :</p>	
<p>1.3) Confiance accordée à votre réponse :</p>	<p>a) Sûre  b) Pas sûre »</p>

Plus précisément, il est demandé dans la question Q1 de déterminer les concentrations des ions chlorure et baryum dans la solution en se servant de la représentation iconographique des ions en solution. Pour répondre à cette question, l'apprenant doit observer la représentation de la solution au niveau sub-microscopique et comprendre que les boules sphériques représentent les ions dans la solution après dissolution du chlorure de baryum  $\text{BaCl}_2$  dans l'eau et que chaque type d'ion n'a qu'une seule concentration dans la solution. Il doit aussi maîtriser, entre autres, la définition de la concentration d'une espèce chimique en solution et son expression mathématique. Il doit utiliser correctement la formule de calcul de la concentration ionique dans ce contexte où il ne travaille pas avec une équation de dissolution comme d'habitude, mais plutôt avec une représentation iconographique qui modélise les ions dans la solution après dissolution totale du chlorure de baryum dans l'eau.

Dans ce cas, la tâche devrait être probablement assez facile pour l'apprenant, car l'équation chimique qui intègre le coefficient stœchiométrique intervenant dans le calcul de la quantité de matière et qui pose d'importantes difficultés aux apprenants lors de la détermination des concentrations des ions en solution intervient de manière explicite (le nombre des boules de  $\text{Cl}^-$  est le double de celui des boules de  $\text{Ba}^{2+}$ ). Pour ce faire, l'apprenant doit tout simplement compter le nombre total des boules qui représentent chaque types d'ions ( $\text{Cl}^-$  et  $\text{Ba}^{2+}$ ) et multiplier par 0,1 mol pour obtenir la quantité de matière qu'il divisera par 0,2 L, qui est le volume de la solution, pour avoir les concentrations demandées. La réponse correcte est donc la proposition (b) à savoir  $[\text{Cl}^-] = 2 \text{ mol/L}$  et  $[\text{Ba}^{2+}] = 1 \text{ mol/L}$  avec une justification pertinente et être sûr de sa réponse.

L'apprenant qui va choisir d'autres réponses (a, c et d) ou qui va proposer autre réponse (e) a des conceptions alternatives ou à un manque de connaissances sur la notion de la concentration d'une espèce ionique dans une solution. Cela en fonction de la justification et du niveau de confiance qu'il accordera à sa réponse. Notons aussi que, le choix de la proposition (e), où l'apprenant propose autre réponse, peut surtout être dû à une erreur de calcul liée à une mauvaise coordination conceptuelle de la part de l'apprenant.

Par exemple, celui qui va choisir la réponse (c) fait une confusion conceptuelle entre la quantité de matière et la concentration d'un ion en solution et, par conséquent, ne maîtrise pas soit la définition de la concentration ionique, soit la formule pour la calculer. Celui qui choisit la réponse (d) fait, en plus d'une confusion conceptuelle entre la quantité de matière et la concentration ionique, une confusion entre le nombre d'entités ioniques en solution et

la quantité de matière de chaque espèce ionique en solution. Par conséquent, ces catégories d'apprenants, en fonction des justifications qu'ils vont proposer et du niveau de confiance qu'ils accorderont à leurs réponses, manquent peut-être de connaissances sur la notion de concentration ionique ou ont des idées fausses sur la concentration ionique (conceptions alternatives), car ils ne tiennent pas compte du volume de la solution dans leur calcul.

Enfin, les apprenants qui opteront pour la réponse (a) ont peut-être une compréhension de la notion de la concentration ionique, mais ne parviennent pas à la mobiliser correctement dans des situations conceptuellement problématiques comme celle-ci. Ils puisent plutôt leur inspiration dans leur cadre routinier interprétatif où dans un exercice, dès qu'il y a la quantité de matière et le volume, on procède directement au calcul de la concentration chimique sans vérifier s'il s'agit bel et bien de la quantité de matière de l'espèce chimique dont on veut déterminer la concentration dans la solution. Cela nous amènera à présumer de leur incapacité à résister à leur habitude interprétative afin de s'adapter aux situations nouvelles ; un manque de connaissances notionnelles ou à l'existence des conceptions alternatives qui entravent la construction du concept, selon la confiance qu'ils accorderont à leurs réponses.

➤ **Analyse de la deuxième question (Q2)**

La question Q2 est centrée sur le calcul des concentrations des ions dans un mélange obtenu après l'addition de deux solutions aqueuses de volume et concentration différents. Elle est formulée de la manière suivante : « *On mélange 0,35 L d'une solution de NaCl de concentration égale à 1,66 mol/L avec 0,15 L d'une solution de NaCl de concentration égale à 0,89 mol/L.*

2.1) <i>Quelles sont les concentrations (en mol/L) des ions Na<sup>+</sup> et Cl<sup>-</sup> dans la solution finale obtenue ?</i>	a) $[Cl^-] = 1,42 \text{ mol/L}$ et $[Na^+] = 1,42 \text{ mol/L}$ b) $[Cl^-] = 2,55 \text{ mol/L}$ et $[Na^+] = 2,55 \text{ mol/L}$ c) $[Cl^-] = 0,71 \text{ mol/L}$ et $[Na^+] = 0,71 \text{ mol/L}$ d) $[Cl^-] = 0,58 \text{ mol/L}$ et $[Na^+] = 0,13 \text{ mol/L}$ e) <i>Autre réponse à préciser.....</i>
2.2) <i>Justifier votre réponse :</i>	
2.3) <i>Confiance accordée à votre réponse :</i>	a) <i>Sûre</i> b) <i>Pas sûre</i> »

Dans cette question, il est demandé concrètement aux apprenants de calculer les concentrations des ions chlorure et sodium dans un mélange obtenu après l'addition de deux solutions de chlorure de sodium NaCl de volume et concentration différents. Par rapport à la première question (Q1), la question Q2 est plus complexe. Elle présente un niveau de difficulté conceptuelle élevé pour sa résolution, car il s'agit d'un mélange de deux solutions aqueuses de chlorure de sodium à des volumes et des concentrations différents. La difficulté ici est aussi liée au fait qu'il s'agit de la dissolution d'un composé ionique dans l'eau et que, pour répondre à la question, l'apprenant doit avoir compris que les ions sodium et chlorure présents dans le mélange obtenu proviennent de deux solutions n'ayant pas les mêmes caractéristiques.

En plus de la maîtrise de la notion de dissolution des solides ioniques dans l'eau et de la maîtrise de la définition et la formule de calcul de la concentration ionique, l'apprenant doit aussi maîtriser le caractère intensif de la grandeur concentration chimique pour répondre à cette question. Pour cela, il doit être conscient que les concentrations ne s'additionnent pas comme c'est le cas pour les grandeurs extensives (masse, volume, quantité de matière...). Par conséquent, comme il s'agit d'un mélange de deux solutions aqueuses ioniques, chaque ion ( $\text{Na}^+$  et  $\text{Cl}^-$ ) dans la solution finale provient d'une solution fille de départ dont il faut au préalable trouver la quantité de matière dans le mélange final, avant de procéder au calcul des différentes concentrations ioniques demandées.

L'apprenant doit aussi maîtriser la notion d'électroneutralité d'une solution afin d'en déduire la concentration d'un ion à partir de la concentration d'un autre ion déjà calculée ou connue. Il doit en outre maîtriser l'écriture des équations de dissolution des solides ioniques dans l'eau et leur équilibration à l'aide de coefficients stœchiométriques qui sont capitaux dans l'établissement des bilans des quantités de matière lors des calculs des concentrations ioniques et d'autres calculs quantitatifs en chimie.

De façon globale, pour déterminer les concentrations des ions chlorure  $\text{Cl}^-$  et sodium  $\text{Na}^+$  dans la solution finale, l'apprenant doit:

- d'abord écrire et équilibrer correctement la ou les équation(s) de dissociation de NaCl dans l'eau pour connaître la provenance des espèces ioniques  $\text{Cl}^-$  et  $\text{Na}^+$  dans la solution finale obtenue ;
- ensuite, regrouper toutes les espèces ioniques de même nature provenant de deux solutions et déterminer leurs quantités de matière dans le mélange final obtenu ;

- enfin, calculer les concentrations des ions  $\text{Cl}^-$  et  $\text{Na}^+$  dans la solution finale en utilisant la formule classique de calcul de la concentration ionique et l'équation traduisant l'électroneutralité tout en sachant que, pour chaque ion donné dans une solution, il n'y a qu'une seule concentration, même s'il provient de deux ou de plusieurs sources différentes.

La réponse correcte est donc la proposition (a), à savoir  $[\text{Cl}^-] = [\text{Na}^+] = 1,42 \text{ mol/L}$  avec une justification pertinente et être sûr de la réponse. Pour cela, l'apprenant qui va choisir d'autres réponses (b, c et d) ou qui va proposer une autre réponse (e) a des conceptions alternatives ou un manque de connaissances sur la notion de la concentration ionique en fonction de la justification et du niveau de confiance qu'il accordera à sa réponse. De plus, une erreur de calcul de la part de ce dernier liée par exemple à un mauvais agencement conceptuel peut conduire à une réponse autre que celles qui lui sont proposées aux choix (e).

Comme illustration, les apprenants qui vont opter pour la réponse (b) ont peut-être une idée assez claire de la notion de la concentration ionique, mais ne maîtrisent pas ou ont un manque des ressources cognitives sur le caractère intensif de la concentration chimique. Pour cela, nous pourrions présumer qu'ils se réfèrent plutôt à leur cadre routinier interprétatif (aux habitudes interprétatives) où dans un exercice, dès qu'on mélange deux solutions de concentration connue, on peut directement procéder au calcul de la concentration chimique en addition les deux concentrations données, comme c'est le cas avec les grandeurs extensives comme la masse ou le volume. Cela pourra traduire leur incapacité à résister aux habitudes interprétatives pour s'adapter aux situations nouvelles, un manque de connaissance notionnelle ou la présence des conceptions alternatives qui entravent la conceptualisation de la concentration ionique.

L'apprenant qui va choisir les réponses (c, d et e) fait une confusion conceptuelle entre la quantité de matière et la concentration d'un ion en solution et, par conséquent, ne maîtrise pas soit la définition de la concentration chimique soit la formule pour la calculer. De plus, il ne tient pas compte du volume de la solution dans son raisonnement, car dans ce cas, il s'agit d'un mélange de deux volumes qui doivent automatiquement s'additionner pour donner le volume final de la solution. Ces catégories d'apprenants, en fonction des justifications qu'ils vont donner et du niveau de confiance qu'ils accorderont à leurs réponses, n'ont peut-être aucune connaissance sur la notion de concentration ionique ou des idées fausses sur la concentration ionique (conceptions alternatives).



➤ **Analyse de la troisième question (Q3)**

La question Q3 est centrée sur la détermination des concentrations des ions dans une solution obtenue après la dissolution complète d'un solide ionique dans l'eau. Elle est formulée comme suit : « On dissout dans l'eau 5 g de sulfate de potassium ( $K_2SO_4$ ) et on obtient une solution de volume égal à 0,1 L.

<p>3.1) Quelle est la concentration (en mol/L) de l'ion potassium (<math>K^+</math>) dans cette solution sachant que <math>M_{K_2SO_4} = 174</math> g/mol ?</p>	<p>a) <math>[K^+] = 0,28</math> mol/L  b) <math>[K^+] = 0,028</math> mol/L  c) <math>[K^+] = 0,57</math> mol/L  d) <math>[K^+] = 50</math> mol/L  e) Autre réponse à préciser.....</p>
<p>3.2) Justifier votre réponse :</p>	
<p>3.3) Confiance accordée à votre réponse :</p>	<p>a) Sûre  b) Pas sûre »</p>

C'est une question classique de calcul des concentrations des ions en solution à laquelle les apprenants sont habitués, mais qui leur pose souvent des difficultés conceptuelles considérables. Ces difficultés sont souvent liées au fait qu'il s'agit de la dissolution d'un composé ionique dans l'eau et que, pour répondre à la question, l'apprenant doit avoir acquis que les ions potassium ( $K^+$ ) et sulfate ( $SO_4^{2-}$ ) ne disparaissent pas après la dissolution de  $K_2SO_4$  dans l'eau, mais sont présents dans la solution obtenue. De plus, il doit être conscient du fait que, lors de cette dissolution, une mole de sulfate de potassium  $K_2SO_4$  libère 2 moles d'ions  $K^+$  et une seule mole d'ions  $SO_4^{2-}$ , et non une mole pour chaque type d'ion (cation et anion), comme dans le cas de la dissolution du chlorure de sodium NaCl dans l'eau dans la question Q2. C'est la raison pour laquelle, l'apprenant doit maîtriser l'écriture et l'équilibrage des équations des dissolutions des solides ioniques dans l'eau.

En outre, en plus de la maîtrise de la formule et de la définition de la concentration ionique, l'apprenant doit être capable d'établir correctement le bilan de la quantité de matière à partir de l'équation de dissolution de  $K_2SO_4$  dans l'eau. Il doit aussi être capable de déterminer la quantité de matière de  $K_2SO_4$  à partir de sa masse. Cela nécessite une bonne conceptualisation de la notion de quantité de matière au préalable de sa part.

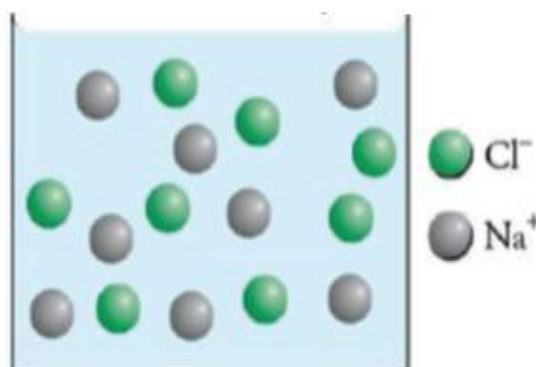
La réponse correcte est donc la proposition (c) à savoir  $[K^+] = 0,57 \text{ mol/L}$  avec une justification pertinente et un niveau de confiance élevé (sûr) accordé à la réponse. Les apprenants qui vont choisir les réponses (a, b et d) ou qui vont proposer une autre réponse (e) ont des conceptions alternatives ou ont un manque de connaissances sur la notion de la concentration ionique, et ce, en fonction de la justification et du niveau de confiance qu'ils accorderont à leur réponse. Tout comme dans les questions précédentes, les erreurs de calcul liées à un mauvais agencement conceptuel peuvent conduire à d'autres propositions des réponses fausses.

Pour plus de précision, les apprenants qui vont choisir la réponse (b) font une confusion conceptuelle entre la quantité de matière et la concentration d'un ion en solution. Par conséquent, ils ne maîtrisent pas la définition de la concentration ionique ou la formule pour la calculer, car ils ne prennent pas en compte le volume de la solution dans leur raisonnement, donc ne considèrent pas la concentration chimique comme une proportion qui dépend de la quantité et du volume de la solution. Ceux qui vont opter pour la proposition (a) font une confusion conceptuelle entre la concentration de la solution (niveau macroscopique) et la concentration d'une espèce chimique en solution (niveau microscopique). Ils ne prennent pas en compte, dans leurs calculs, le coefficient stœchiométrique deux (2) placé devant l'ion potassium lorsqu'on écrit l'équation de dissolution de  $K_2SO_4$  dans l'eau ( $K_2SO_4 \longrightarrow 2K^+ + SO_4^{2-}$ ). Cela pourra s'expliquer par le fait que ces apprenants, en fonction des justifications qu'ils vont donner et du niveau de confiance qu'ils accorderont à leurs réponses, manquent peut-être de connaissances sur la notion de concentration ionique ou ont des idées fausses sur la notion de concentration ionique (conceptions alternatives).

Les apprenants qui opteront, à leur tour, pour la proposition (d) en proposant une justification pertinente disposent des ressources cognitives superficielles sur le concept de la concentration chimique au niveau macroscopique (concentration massique), mais sont incapables de les mobiliser et de les faire fonctionner au niveau microscopique pour déterminer la concentration de l'ion potassium. De plus, bien qu'ayant des connaissances sur la notion de concentration chimique de manière générale, ils font une confusion conceptuelle entre la concentration massique et la concentration molaire volumique au niveau macroscopique, car la concentration de l'ion potassium dans ce cas est exprimée en mol/L (concentration molaire) au lieu de g/L (concentration massique).

➤ **Analyse de la quatrième question (Q4)**

La question Q4 est centrée sur la détermination des concentrations des ions dans une solution diluée. Elle est formulée en ces termes : « *Le schéma suivant représente une solution aqueuse de NaCl de volume égal à 0,40 L. On ajoute dans cette solution 0,10 L d'eau.* »



<p>4.1) <i>Quelle est la concentration (en mol/L) de l'ion sodium (<math>\text{Na}^+</math>) dans la solution finale obtenue ? Considérez que chaque sphère représente 0,10 mol de l'ion en solution.</i></p>	<p>a) <math>[\text{Na}^+] = 0,80 \text{ mol/L}</math>  b) <math>[\text{Na}^+] = 2 \text{ mol/L}</math>  c) <math>[\text{Na}^+] = 1,6 \text{ mol/L}</math>  d) <math>[\text{Na}^+] = 16 \text{ mol/L}</math>  e) <i>Autre réponse à préciser.....</i></p>
<p>4.2) <i>Justifier votre réponse :</i></p>	
<p>4.3) <i>Confiance accordée à votre réponse :</i></p>	<p>a) <i>Sûre</i>  b) <i>Pas sûre »</i></p>

Tout comme à la question Q1, il est demandé aux apprenants dans cette question, de déterminer la concentration de l'ion sodium  $\text{Na}^+$  en se servant d'une représentation iconographique, cette fois-ci, d'une solution diluée. Pour répondre à la question Q4, l'apprenant doit comprendre que les boules représentent les ions chlorure et sodium dans la solution. Ensuite, il doit aussi avoir conceptualisé que chaque type d'ions en solution a une seule concentration dans une solution. Il doit maîtriser, entre autres, la définition de la concentration d'une espèce chimique en solution et son expression mathématique. Enfin, l'apprenant doit mobiliser correctement la formule de calcul de la concentration ionique dans ce contexte où il ne travaille pas avec une équation de dissolution comme d'habitude, mais plutôt avec une représentation iconographique qui modélise les ions chlorure  $\text{Cl}^-$  et sodium  $\text{Na}^+$  dans une solution diluée.

Dans ce cas, pour simplifier la tâche, nous avons opté pour un sel binaire où la charge de chacun des ions est +1 (ions sodiums  $\text{Na}^+$ ) et -1 (ions chlorures  $\text{Cl}^-$ ). La seule difficulté que l'apprenant devra surmonter est la prise en compte, dans son raisonnement, de l'impact de la dilution d'une solution sur le volume de la solution lors de la détermination de la concentration chimique. En effet, cela va engendrer une variation du volume final de la solution. C'est la raison pour laquelle le volume que l'apprenant devra utiliser pour déterminer la concentration des ions sodiums dans la solution finale est de 0,5 L, soit la somme des volumes de la solution du départ (0,4 L) et d'eau ajoutée (0,1 L). Pour ce faire, l'apprenant doit être conscient du fait que la concentration chimique est inversement proportionnelle au volume de la solution à quantité de matière constante. Plus le volume de la solution augmentera, moins la solution sera concentrée en une espèce chimique si sa quantité de matière reste constante.

Une fois tous les paramètres énumérés précédemment intégrés par l'apprenant dans son raisonnement, il doit compter le nombre total des boules qui représentent l'ion  $\text{Na}^+$  et le multiplier par 0,1 mol pour obtenir la quantité de matière, qu'il divisera par 0,5 L pour obtenir la concentration de l'ion  $\text{Na}^+$  demandée. La réponse correcte est donc la proposition (c) à savoir  $[\text{Na}^+] = 1,6 \text{ mol/L}$  avec une justification pertinente et être sûr de sa réponse.

Les apprenants qui vont choisir d'autres réponses (a, b et d) ou qui vont proposer une autre réponse (e) ont des conceptions alternatives ou ont un manque de connaissances sur la notion de la concentration ionique, et ce, en fonction de la justification et du niveau de confiance qu'ils accorderont à leurs réponses. Il est aussi important de noter qu'une erreur de calcul liée à un mauvais agencement conceptuel de la part de l'apprenant peut conduire à la formation d'une réponse autre que celles proposées.

Plus précisément, l'apprenant qui va choisir la réponse (a) fait une confusion conceptuelle entre la quantité de matière et la concentration d'un ion en solution et, par conséquent, ne maîtrise ni la définition de la concentration ionique, ni la formule pour la calculer. Celui qui choisit la réponse (d) fait, en plus d'une confusion conceptuelle entre la quantité de matière et la concentration ionique, une confusion entre le nombre d'entités ioniques en solution et la quantité de matière de chaque espèce ionique en solution. Par conséquent, ces catégories d'apprenants, en fonction des justifications qu'ils vont proposer et du niveau de confiance qu'ils accorderont à leurs réponses, ont soit un manque de connaissances sur la notion de concentration ionique ou soient des idées fausses sur la

concentration ionique (conceptions alternatives), car ils ne tiennent pas compte du volume de la solution obtenu après la dilution dans leur calcul.

Enfin, les apprenants qui vont opter pour la réponse (b) ont peut-être une compréhension de la notion de la concentration ionique, mais ne parviennent pas à la mobiliser correctement dans des situations conceptuellement problématiques où la dilution intervient. Nous pouvons présumer, dans ce cas, que cette catégorie d'apprenants puise plutôt son raisonnement dans leur cadre routinier interprétatif. En effet dans un exercice, dès qu'il y a la quantité de matière et le volume, on procède directement au calcul de la concentration chimique sans vérifier s'il s'agit bel et bien du volume de la solution finale obtenue. Cela pourra se justifier soit par leur incapacité à résister à leur habitude interprétative afin de s'adapter aux situations nouvelles ; soit par un manque de connaissance notionnelle; soit par l'existence des conceptions alternatives qui entravent la construction du concept ; soit aussi par leur incapacité à inhiber la conception non pertinente volume de solvant (0,4 L ou 0,1 L) qui ne marche dans ce contexte, au profit de la conception pertinente volume de la solution (0,4 + 0,1 L = 0,5 L).

➤ **Analyse de la cinquième question (Q5) et de la sixième question (Q6)**

Les questions Q5 et Q6 abordent exclusivement le caractère intensif de la grandeur concentration chimique au niveau microscopique. La question Q5 est formulée de la manière suivante : « *On mélange deux volumes égaux d'une même solution de chlorure de sodium NaCl de concentration égale à 0,10mol/L.*

<p>5.1) <i>Quelle est la concentration (en mol/L) de l'ion chlorure (Cl<sup>-</sup>) dans la solution finale obtenue ?</i></p>	<p>a) <math>[Cl^-] = 0,20 \text{ mol/L}</math>  b) <math>[Cl^-] = 0,05 \text{ mol/L}</math>  c) <math>[Cl^-] = 0,10 \text{ g/mol}</math>  d) <math>[Cl^-] = 0.10 \text{ mol/L}</math>  e) <i>Autre réponse à préciser.....</i></p>
<p>5.2) <i>Justifier votre réponse :</i></p>	
<p>5.3) <i>Confiance accordée à votre réponse</i></p>	<p>a) <i>Sûre</i>  b) <i>Pas sûre</i></p>

Et la question Q6 est formulée de la manière suivante : « Soient 5 solutions aqueuses identiques (même soluté et même solvant) de concentration en ion calcium ( $\text{Ca}^{2+}$ ) égale à 0.20 mol/L. On rassemble dans un même récipient les 5 solutions.

6.1) Quelle est la concentration (en mol/L) de l'ion $\text{Ca}^{2+}$ dans la solution finale obtenue ?	a) $[\text{Ca}^{2+}] = 0,20 \text{ mol/L}$ b) $[\text{Ca}^{2+}] = 0,04 \text{ mol/L}$ c) $[\text{Ca}^{2+}] = 5 \text{ mol/L}$ d) $[\text{Ca}^{2+}] = 1 \text{ mol/L}$ e) Autre réponse à préciser.....
6.2) Justifier votre réponse :	
6.3) Confiance accordée à votre réponse :	a) Sûre b) Pas sûre »

Il est demandé dans ces deux questions de déterminer respectivement les concentrations des ions chlorures et des ions calciums dans un mélange de deux ou de plusieurs solutions de mêmes caractéristiques. Pour ce faire, lors des résolutions des questions Q5 et Q6, en plus des notions pivots comme la définition de la concentration ionique et de son expression mathématique, la dissolution, la dilution et le caractère intensif de la grandeur concentration, les apprenants doivent avoir acquis que l'ajout d'un volume ou de plusieurs volumes de la même solution (même concentration) ne fait pas varier la concentration ionique ou celle de la solution obtenue. Les réponses justes sont respectivement : la proposition (d), à savoir  $[\text{Cl}^-] = 0,10 \text{ mol/L}$  pour la question Q5, et la proposition (a),  $[\text{Ca}^{2+}] = 0,20 \text{ mol/L}$  pour la question Q6.

Tous les apprenants qui vont choisir d'autres réponses c'est-à-dire, les réponses (a, b et c) pour la question Q5 et les réponses (b, c et d) pour la question Q6, ont des conceptions alternatives ou ont un manque de connaissances sur la notion de la concentration ionique. Il en est de même pour ceux qui vont proposer d'autres réponses (e), et ce, en fonction de la justification et du niveau de confiance qu'ils accorderont à leurs réponses. Il est également important de noter que les erreurs de calcul peuvent aussi conduire aux formulations d'autres réponses autres que celles qui sont proposées.

Plus explicitement, en ce qui concerne la question Q5, l'apprenant qui va choisir la réponse (a) ne maîtrise pas le caractère intensif de la concentration chimique. C'est aussi le

cas pour l'apprenant qui va choisir la réponse (d) pour la question Q6. Ce dernier fait une confusion entre les grandeurs extensives (masse, volume, quantité de matière...), qui s'additionnent lors d'un mélange, et les grandeurs intensives (température, pression, concentration...), qui ne s'additionnent pas lors d'un mélange. Il ne comprend pas que lors de l'addition des solutions de même nature, de même concentration et de même volume, les deux grandeurs extensives (la quantité de matière et le volume) dont dépend la concentration varient de manière constante. Et par conséquent, comme la concentration est un rapport de proportion entre les deux, leur constante variation n'impacte ni sur la concentration de la solution, ni sur la concentration des espèces moléculaires ou ioniques en solution.

Il en est de même pour les apprenants qui vont opter pour les réponses (b et c) pour les deux questions (Q5 et Q6). Ils ont des connaissances notionnelles complètement erronées sur le concept de la concentration ionique volumique, car il s'agit tout simplement des réponses distrayantes. Ces réponses n'ont rien à voir avec les processus de calcul de la concentration ionique. Cela montrera que c'est le hasard ou des raisonnements non cohérents (conceptions alternatives ou non pertinentes) qui guident leurs choix et non un processus de raisonnement cohérent (conceptions pertinentes), quels que soient la justification et le niveau de confiance qu'ils accorderont à leurs réponses.

➤ **Analyse de la septième question (Q7)**

La question Q7 est centrée sur le caractère intensif de la grandeur concentration chimique au niveau microscopique comme les questions Q5 et Q6. Sa particularité est qu'elle vise la détermination de la concentration massique (g/L) des molécules de glucose dans une solution, et non la détermination de la concentration molaire volumique des espèces ioniques en solution, comme c'est le cas dans d'autres questions. De plus, c'est aussi une situation concrète que les apprenants rencontrent dans leur vie quotidienne, mais sans y prêter beaucoup d'attention. Elle est formulée en ces termes : « Une bouteille (1,5 L) de jus Chapman contient 131 g/L de glucose ( $C_6H_{12}O_6$ ). On divise ce jus dans 3 verres de 0,5 L chacun.

<p>7.1) <i>Quelle est la concentration (en g/L) du glucose dans chaque verre de jus ?</i></p> <p><math>M_{C_6H_{12}O_6} = 180 \text{ g/mol}</math></p>	<p>a) <math>[C_6H_{12}O_6] = 43,67 \text{ g/L}</math>  b) <math>[C_6H_{12}O_6] = 262 \text{ g/L}</math>  c) <math>[C_6H_{12}O_6] = 83,33 \text{ g/L}</math>  d) <math>[C_6H_{12}O_6] = 131 \text{ g/L}</math></p>
--	---

	<i>e) Autre réponse à préciser.....</i>
<i>7.2) Justifier votre réponse :</i>	
<i>7.3) Confiance accordée à votre réponse :</i>	<i>a) Sûre b) Pas sûre »</i>

Pour y répondre, les apprenants doivent avoir acquis que la division d'un volume de même concentration en plusieurs volumes ne fait pas varier la concentration d'une espèce chimique en solution ou celle de la solution obtenue. Notons aussi que, même sans avoir de connaissances notionnelles profondes sur la concentration chimique, les apprenants peuvent répondre correctement à cette question, car il s'agit d'une situation de partage que les apprenants vivent au quotidien. La réponse correcte est donc la proposition (d), c'est-à-dire  $[C_6H_{12}O_6] = 131 \text{ g/L}$ .

Tous les apprenants qui choisiront d'autres réponses (a, b et c) ont des conceptions alternatives ou ont un manque de connaissances sur l'intensivité de la grandeur concentration massique au niveau microscopique. Il en est de même pour ceux qui vont proposer autres réponses (e) en fonction de la justification et du niveau de confiance qu'ils accorderont à leurs réponses.

Plus explicitement, l'apprenant qui va choisir la réponse (a) ne maîtrise pas le caractère intensif de la concentration chimique. Ce dernier fait une confusion entre les grandeurs extensives (masse, volume, quantité de matière...), qui se divisent lors du partage d'une solution en plusieurs volumes, et les grandeurs intensives (température, pression, concentration...), qui ne se divisent pas au cours du même processus. Cet apprenant ne comprend pas que comme dans le cas de l'addition des solutions de mêmes caractéristiques, la division d'une solution en plusieurs volumes n'affecte ni la concentration chimique, ni la concentration des espèces chimiques en solution. En effet, les deux grandeurs extensives (masse de soluté et volume de la solution) dont dépend la concentration chimique vont baisser simultanément et de manière constante ; par conséquent, comme la concentration est un rapport de proportion entre les deux, elle ne sera pas impactée.

Il en est de mêmes pour les apprenants qui vont opter pour les réponses (b et c), ils ont des conceptions totalement erronées sur le concept de la concentration massique d'une molécule en solution, car comme dans le cas des questions Q5 et Q6, il s'agit des réponses



distractrices. Ces réponses n'ont rien à voir avec les processus de calcul de la concentration massique des substances en solution. Cela montre que c'est le hasard ou les raisonnements non conceptuels qui guident leurs choix et non un processus de raisonnement cohérent (conceptions pertinentes), quels que soient la justification et le niveau de confiance qu'ils accorderont à leurs réponses.

### **3.2. Méthode de collecte des données du post-test**

Les données issues du post-test ont été recueillies un mois après l'implantation des différents types de remédiation qui s'est déroulée entre janvier et mi-février 2021. C'est la raison pour laquelle nous allons au préalable décrire les activités effectuées par les apprenants lors de l'implantation des différents types de remédiation conçus et le déroulement de chaque type de remédiation en situation de classe avant de présenter la méthode que nous avons utilisée pour recueillir les données du post-test.

#### **3.2.1. Description des activités de la phase d'expérimentation**

Les différentes activités qui constituent la fiche d'activités proposée aux participants lors de l'implantation des différents types de remédiation sont conçues pour remédier aux principales difficultés des participants identifiées à la phase pré-test. Mais avant de les décrire, rappelons qu'à l'issue de la phase du pré-test, les principales difficultés que rencontrent les apprenants ainsi que les causes des raisonnements erronés qu'ils mènent au cours de la détermination de la concentration d'une espèce chimique en solution identifiées sont:

- leur incapacité à déterminer correctement les concentrations des espèces chimiques dans une solution lorsque la dissolution ne s'effectue plus suivant la proportion 1/1. C'est-à-dire lorsqu'une mole de substance ionique dissoute dans l'eau, par exemple, ne libère pas une mole de chaque type d'ion qu'elle renferme. Leur incapacité à faire fonctionner la formule de calcul de la concentration d'une solution ( $C = n/V$ ) lorsqu'il s'agit de la détermination des concentrations des espèces ioniques en solution. Ces types de difficultés sont principalement liés à la non-maîtrise du calcul de la quantité de matière d'une espèce chimique en solution ; la non-maîtrise de l'écriture et l'équilibrage des équations de la dissolution des composées ioniques dans l'eau ; la non-prise en compte des coefficients stœchiométriques présents dans les équations de dissolution lors de l'établissement du bilan des quantités de matière lorsqu'ils parviennent à écrire lesdites équations de dissolution ; la présence de la

conception alternative selon laquelle « toutes les dissolutions des composés ioniques dans l'eau se font suivant la proportion 1/1 quels que soient les types d'ions qui les constituent » ; la confusion conceptuelle entre la quantité de matière et la concentration d'un ion en solution ; l'attribution des valeurs numériques incorrectes aux variables de la concentration ionique pour procéder rapidement au calcul numérique liée probablement à une interprétation erronée de l'énoncé ; la non-acquisition des concepts tels que la quantité de matière, la dissolution, la proportionnalité d'une grandeur, pour ne citer que celles-ci, imbriqués autour de la concentration d'une espèce chimique (ions ou molécules) en solution ;

- leur incapacité à mobiliser correctement le caractère intensif de la grandeur concentration chimique. Cette difficulté est principalement associée à : l'existence chez les apprenants des conceptions alternatives selon lesquelles « chaque solution ionique fille apporte un seul type d'ion au cours de leur mélange » ; « la concentration d'une substance ionique égale la somme des concentrations des ions qu'elle referme » ou « la concentration ionique se divise lors du partage d'une solution en plusieurs volumes » ; l'interprétation erronée des données présentes dans un énoncé ; la mobilisation des heuristiques telles que « des valeurs numériques dans un énoncé impliquent automatiquement des calculs numériques dans la réponse » qui leur empêche de voir au-delà des chiffres afin de mener un raisonnement conceptuel logique ; la confusion entre la concentration massique d'une espèce chimique en solution et sa concentration molaire volumique ;
- leur incapacité à déterminer correctement les concentrations des espèces chimiques dans une solution diluée. Cette difficulté est principalement associée à : la non-prise en compte du caractère extensif du volume de la solution après l'ajout du solvant entraînant soit la mobilisation du volume initial de la solution, soit la mobilisation du volume d'eau ajoutée dans les calculs qu'ils effectuent ; la confusion, une fois de plus, entre la concentration d'une espèce ionique et sa quantité de matière dans une solution.
- les résultats obtenus à la phase du pré-test montrent aussi que les difficultés qu'ont les apprenants à déterminer correctement la concentration d'une espèce chimique en solution sont aussi dues à un manque de connaissances conceptuelles sur le concept lui-même ainsi que les notions qui s'imbriquent autour de lui. Ces difficultés sont aussi dues, dans une infime de cas, à une mauvaise coordination, dans les réponses, des notions acquises au cours de la conceptualisation de la concentration chimique.

Elles peuvent également provenir d'une combinaison entre les connaissances scientifiques et les conceptions alternatives omniprésentes dans les modèles mentaux des apprenants et de la manière dont la concentration chimique est parfois transposée par certains acteurs du système éducatif.

Une fois que ce rappel est fait, procédons à la description générale et à la description spécifique des différentes activités des séquences de remédiation.

### ➤ **Description générale des activités**

Chaque séquence de remédiation est constituée de huit (8) activités. Les activités 1, 2 et 3 ont pour but d'amener les apprenants à mieux comprendre certaines notions élémentaires<sup>52</sup> nécessaires pour l'acquisition du concept de concentration chimique et plus particulièrement la concentration d'une espèce chimique. Les activités 4 et 5 entraînent les apprenants au processus de calcul de la concentration d'une espèce chimique dans une solution où la dissolution du soluté dans l'eau s'est faite suivant la proportion 1/1 (activité 4) et dans une solution où la dissolution du soluté dans l'eau ne s'est pas faite suivant la proportion 1/1 (activité 5 et activité 6). L'activité 6 entraîne également les apprenants aux processus de calcul de la concentration d'une espèce chimique dans un mélange des solutions n'ayant pas les mêmes caractéristiques (n'ayant pas les mêmes concentrations chimiques et les mêmes solutés). L'activité 7 entraîne les apprenants à mobiliser le caractère intensif de la grandeur concentration chimique pour déterminer les concentrations des espèces chimiques dans un mélange des solutions de même nature (même concentration chimique, et même soluté) ou dans différents volumes de solutions obtenus en divisant une solution mère sans faire les calculs numériques. Enfin, l'activité 8 entraîne les apprenants au processus de calcul de la concentration d'une espèce chimique dans une solution diluée.

Lesdites activités sont réalisées sur un support papier et l'énoncé de chaque activité est le résultat d'une expérience ou d'une situation de vie concrète décrite littéralement par un texte accompagné, dans la plupart des cas, d'une schématisation iconographique de la solution. Ces représentations iconographiques visualisent les espèces chimiques dans une solution ou amènent les apprenants à représenter eux-mêmes les espèces chimiques dans une

---

<sup>52</sup> Il s'agit principalement de la dissolution d'un solide ionique dans l'eau, l'écriture et l'équilibrage des équation-bilans de dissolution, la quantité de matière et la dilution.

solution au niveau microscopique. Autrement dit, dans la plupart de ces activités, ce sont les apprenants qui produisent eux-mêmes les schématisations.

L'accompagnement des textes de plusieurs de ces activités par des schémas est motivé par les résultats de certaines recherches en didactique de la chimie. Par exemple, les recherches de : Devetak et al. (2009) ; De Berg (2012) ; Goes et al. (2020) et Raviolo et al. (2021) rapportent que lorsque les apprenants ont accès aux représentations visuelles pertinentes qui modélisent les phénomènes chimiques, il leur devient plus facile de comprendre les concepts qu'on veut leur faire acquérir. À ce sujet, Ayina Bouni (2013) affirme également qu'en l'absence de schéma, les élèves et même les étudiants éprouveraient d'énormes difficultés à résoudre le problème chimique qui leur est posé. Il poursuit en présumant que la schématisation iconographique constitue une aide précieuse dans la conduite d'un raisonnement logique. Car elle met à la disposition de l'apprenant tous les paramètres expérimentaux (verrerie, les propriétés microscopiques d'une solution obtenue après la dissolution d'un soluté dans l'eau, etc.) tout en le libérant des contraintes matérielles qui entourent une expérimentation (montage, sécurité, mesure diverse, etc.) (Ayina Bouni, 2013). Ainsi, les icônes utilisées lors de ces différentes représentations schématiques – par exemple des boules colorées ou les boules avec les signes « - » et « + » utilisées pour modéliser les ions dans les différentes solutions proposées – sont au sens peircien<sup>53</sup>, des signes qui possèdent les caractères qui les rendent signifiants, même s'ils n'existent pas concrètement (Ayina Bouni, 2013). En d'autres termes, ces icônes représentent les entités (objets) chimiques à travers lesquelles les élèves effectuent un travail d'appropriation de connaissances.

### ➤ Description de chaque activité

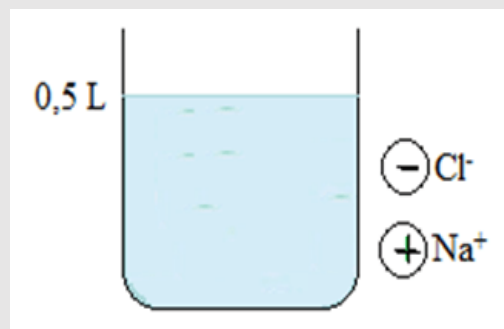
Les activités sont présentées dans les encadrés, suivi de leur description respective.

#### **« Activité 1 : représentation iconographique des ions contenus dans une solution ionique au niveau sub-microscopique »**

*1.1. On dissout 0,4 mol de chlorure de sodium NaCl(s) dans un bécher contenant 0,45 L d'eau et on obtient une solution de volume final égal à 0,5 L. Représenter à l'aide des*

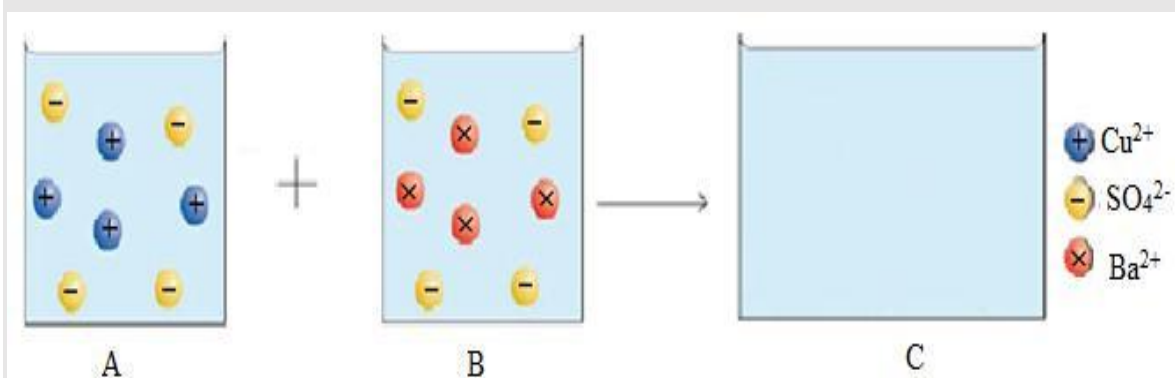
<sup>53</sup> Pour Peirce, le plus haut degré de réalité n'est atteint que par les signes, c'est-à-dire par les idées. À cet effet, les signes iconiques constituent en chimie plus particulièrement, un moyen efficace pour communiquer directement une idée (Ayina Bouni, 2013).

sphères, les ions chlorures  $\text{Cl}^-$  ( $\ominus$ ) et les ions sodiums  $\text{Na}^+$  ( $\oplus$ ) présents dans la solution finale représentée par le schéma ci-dessous.



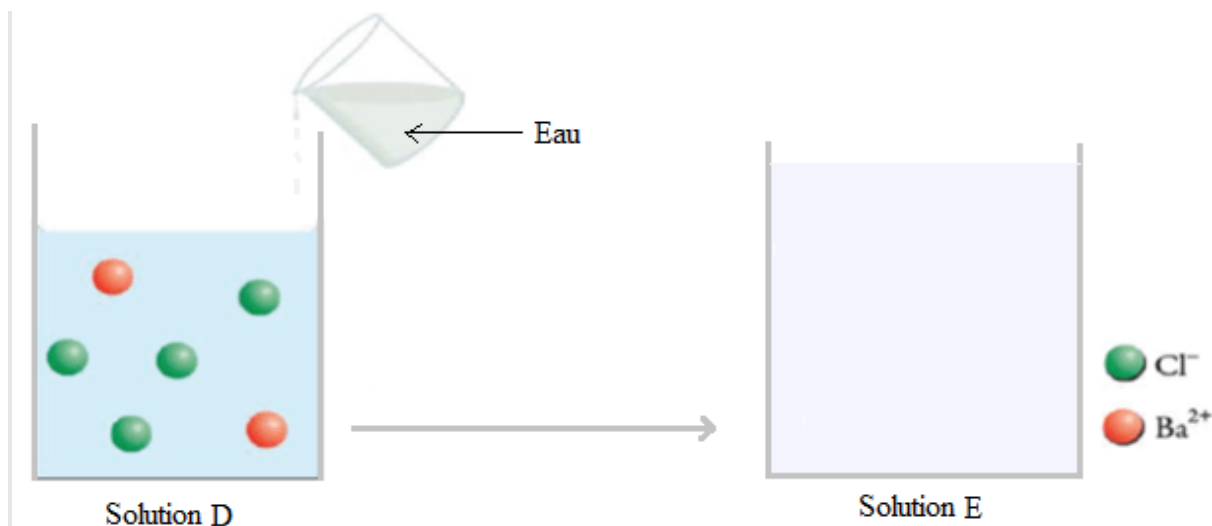
Considérer que chaque sphère représente 0,10 mol de l'ion en solution.

1.2. Une solution C est obtenue en mélangeant deux solutions aqueuses A et B contenant différents ions ( $\text{Ba}^{2+}$ ,  $\text{Cu}^{2+}$  et  $\text{SO}_4^{2-}$ ) comme l'indique le schéma ci-dessous.



Représenter les différents ions dans la solution finale C obtenue.

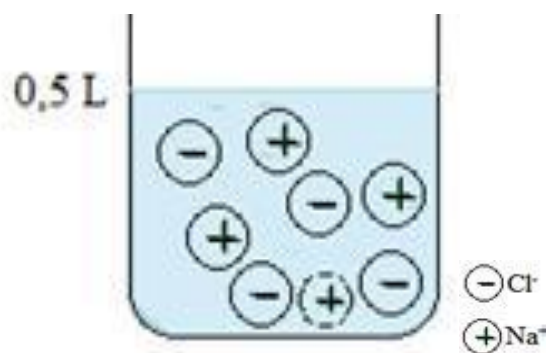
1.3. Une solution E est obtenue en ajoutant 200 mL d'eau dans une solution aqueuse D de chlorure de baryum ( $\text{BaCl}_2$ ) de volume égal à 500 mL comme l'indique le schéma ci-dessous.



1.3.1. Comment appelle-t-on l'opération qui conduit à l'obtention de la solution E ?

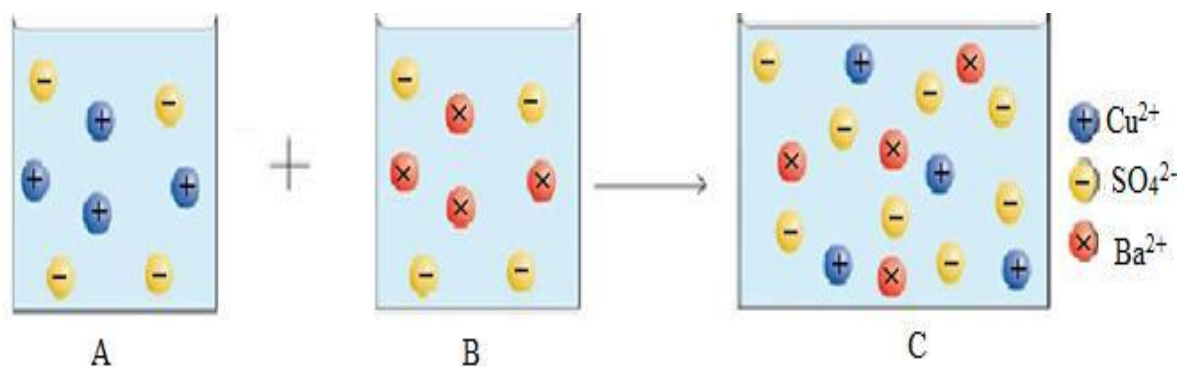
1.3.2. Représenter les ions chlorures et les ions baryums dans la solution E ».

Cette activité initie les apprenants à la représentation des ions dans une solution ionique aqueuse obtenue en dissolvant un solide ionique dans l'eau (question 1.1) ou en diluant une solution aqueuse ionique (question 1.3), afin qu'ils prennent conscience de leur présence dans la solution finale obtenue même-ci ces ions ne sont pas visibles à l'œil nu. La représentation correcte attendue pour la question 1.1 est :



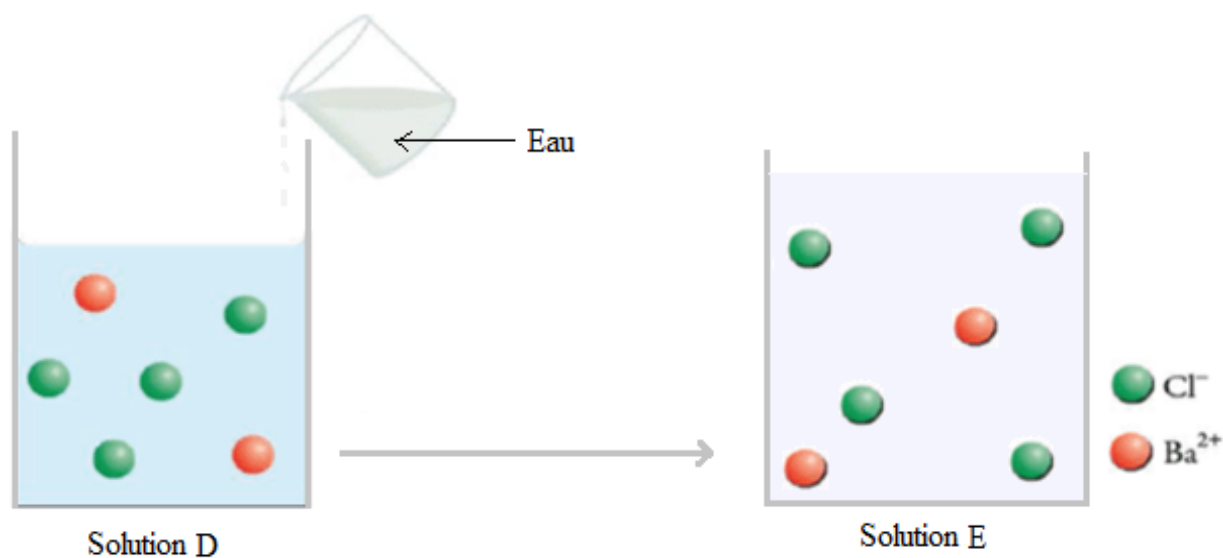
Pour aboutir à cette représentation sub-microscopique des espèces ioniques en solution, les apprenants doivent déterminer au préalable le nombre des sphères qui représentent chaque espèce ionique dans la solution à partir de leurs quantités de matière respectives. Pour cela, les apprenants doivent déterminer les quantités de matière d'ions  $\text{Na}^+$  et  $\text{Cl}^-$  dans la solution à partir du bilan des quantités de matière ( $n_{\text{Na}^+} = n_{\text{Cl}^-} = n_{\text{NaCl}} = 0,4 \text{ mol}$ ) qu'ils diviseront par 0,1 mol, qui est la quantité de matière que représente chaque sphère en solution. Soit  $0,4/0,1 = 4$  sphères pour chaque type d'ions.

Pour la question 1.2, la représentation correcte attendue est :



Cette représentation permet aux apprenants de prendre conscience que la dissolution d'un solide ionique dans l'eau est une transformation physique et non une transformation chimique<sup>54</sup>. Elle permet aussi aux apprenants de prendre conscience qu'au cours d'un mélange des solutions ioniques, toutes les espèces ioniques présentes dans chaque solution du départ sont aussi présentes dans la solution finale obtenue sans que leur structure ne soit modifiée.

Pour la question 1.3, les réponses justes attendues sont : la dilution pour la question 1.3.1 et la représentation ci-dessous pour la question 1.3.2.



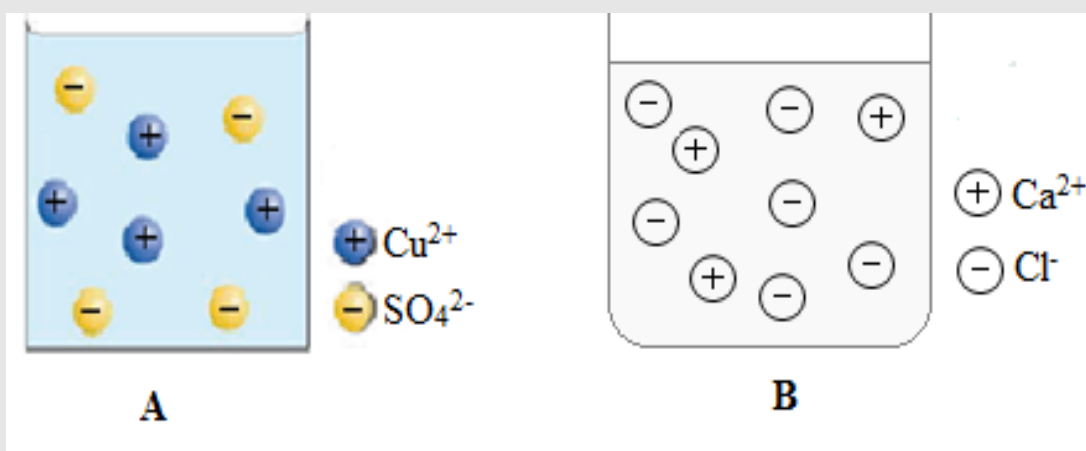
<sup>54</sup> Une transformation physique est le passage d'un corps d'une forme physique à une autre sans modification de la nature des molécules mises en jeu. Alors qu'une transformation chimique est le passage d'un système chimique de son état initial à son état final accompagné d'une réorganisation des atomes (ou éléments) au sein des entités moléculaires ou ioniques qui se conservent en nature et en nombre (Mzoughi-Khadhraoui, et al., 2011).

À travers cette représentation, les apprenants doivent prendre conscience du fait que la dilution n'impacte pas sur les quantités de matière des ions contenus dans une solution, mais elle augmente plutôt le degré de leur dispersion dans la solution. Car les sphères représentant les ions  $\text{Cl}^-$  et  $\text{Ba}^{2+}$  se sont plus éloignées les unes par rapport aux autres dans la représentation de la solution E comparativement à la représentation de la solution D ; et leurs nombres dans les deux représentations sont identiques bien que le volume de la solution E soit supérieur au volume de la solution D.

**« Activité 2 : écriture et équilibrage des équations de dissolution des composés ioniques dans l'eau »**

2.1. Écrire et équilibrer les équation-bilans de dissolution dans l'eau des composés ioniques suivants : hydroxyde de calcium ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ), hydroxyde de potassium ( $\text{KOH}$ ), chlorure de baryum ( $\text{BaCl}_2$ ) et nitrate d'argent ( $\text{AgNO}_3$ ).

2.2. Le schéma ci-dessous représente deux solutions aqueuses A et B. La solution A est constituée d'ions cuivre II ( $\text{Cu}^{2+}$ ) et d'ions sulfates ( $\text{SO}_4^{2-}$ ) et la solution B est constituée d'ions calciums ( $\text{Ca}^{2+}$ ) et d'ions chlorures ( $\text{Cl}^-$ ).



Nommer les composés ioniques dissouts dans l'eau pour obtenir les solutions A et B, puis écrire leurs équation-bilans de dissolution dans l'eau ».

L'activité 2 initie les apprenants à l'écriture et à l'équilibrage des équation-bilans de dissolution de certains composés ioniques dans l'eau. Les équation-bilans attendues de dissolution pour la question 2.1 sont :

- $\text{Ca}(\text{OH})_{2(s)} \longrightarrow \text{Ca}^{2+}_{(aq)} + 2\text{OH}^-_{(aq)}$  pour l'hydroxyde de calcium ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) ;
- $\text{KOH}_{(s)} \longrightarrow \text{K}^+_{(aq)} + \text{OH}^-_{(aq)}$  pour l'hydroxyde de potassium ( $\text{KOH}$ ) ;



- $\text{BaCl}_{2(s)} \longrightarrow \text{Ba}^{2+}_{(aq)} + 2\text{Cl}^{-}_{(aq)}$  pour le chlorure de baryum ( $\text{BaCl}_2$ ) ;
- $\text{AgNO}_{3(s)} \longrightarrow \text{Ag}^{+}_{(aq)} + \text{NO}_3^{-}_{(aq)}$  pour le nitrate d'argent ( $\text{AgNO}_3$ ).

Pour arriver à cette réponse, les apprenants doivent prendre conscience que ce ne sont pas tous les composés ioniques qui se dissolvent dans l'eau suivant la proportion 1/1. Par exemple, une mole de chlorure de baryum ( $\text{BaCl}_2$ ) dans l'eau libère une mole d'ions baryum ( $\text{Ba}^{2+}$ ) et 2 moles d'ions chlorures ( $\text{Cl}^-$ ). Par contre, une mole de nitrate d'argent ( $\text{AgNO}_3$ ) libère plutôt dans l'eau une mole d'ion argent ( $\text{Ag}^+$ ) et une mole d'ions nitrate ( $\text{NO}_3^-$ ).

Les réponses correctes attendues pour la question 2.2 sont : le sulfate de cuivre  $\text{CuSO}_4$  pour la solution A et le chlorure de calcium  $\text{CaCl}_2$  pour la solution B. Leurs équation-bilans respectives de dissolution dans l'eau sont :  $\text{CuSO}_{4(s)} \longrightarrow \text{Cu}^{2+}_{(aq)} + \text{SO}_4^{2-}_{(aq)}$  et  $\text{CaCl}_{2(s)} \longrightarrow \text{Ca}^{2+}_{(aq)} + 2\text{Cl}^{-}_{(aq)}$ . Pour parvenir à ces réponses, les apprenants doivent se servir des représentations iconographiques des solutions A et B données dans l'énoncé, qui visualisent les ions en solution au niveau sub-microscopique, et comprendre que chaque solution renferme deux types d'ions (anion et cation) et est électriquement neutre. C'est-à-dire chaque solution contient autant des charges positives que des charges négatives. Ainsi, les composés ou solides ioniques qui ont été dissous pour obtenir respectivement les solutions A et B sont constitués, chacun, d'un anion et d'un cation à des proportions qui respectent toujours la neutralité électrique globale. Par exemple, dans la solution A, le nombre d'ions  $\text{Cu}^{2+}$  (cation) égal au nombre d'ions  $\text{SO}_4^{2-}$  (anion). Alors que dans la solution B, le nombre d'ion  $\text{Cl}^-$  est le double du nombre d'ions  $\text{Ca}^{2+}$ . Car l'ion  $\text{Ca}^{2+}$  porte deux charges positives et l'ion  $\text{Cl}^-$  porte une charge négative et pour assurer la neutralité électrique, il faut deux fois plus de charge négative.

### « Activité 3 : Calcul de la quantité de matière »

3.1. Compléter le tableau ci-dessous.

Nom de la molécule	Formule de la molécule	Masse molaire (g/mol)	Masse (g)	Quantité de matière (mol)
Glucose	$\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6$	180	12	?
Sulfate d'aluminium	$\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$	?	10	?
Eau	$\text{H}_2\text{O}$	18	?	55,56

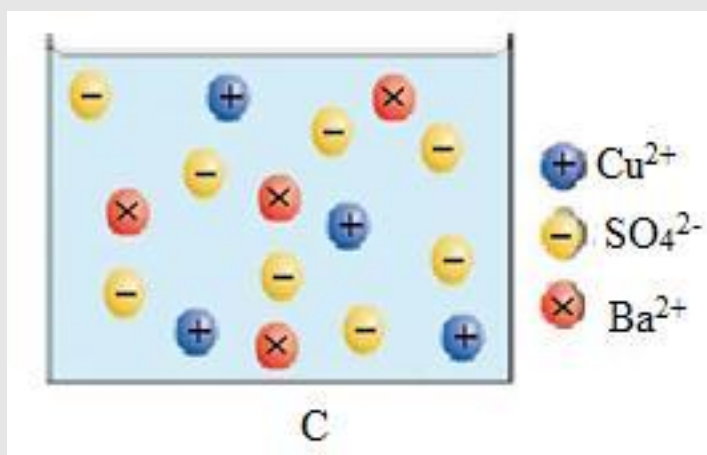
On donne :

- Masse molaire de l'hydrogène :  $M_H = 1 \text{ g/mol}$  ;
- Masse molaire du carbone :  $M_C = 12 \text{ g/mol}$  ;
- Masse molaire de l'oxygène :  $M_O = 16 \text{ g/mol}$  ;
- Masse molaire d'aluminium :  $M_{Al} = 27 \text{ g/mol}$  ;
- Masse molaire du soufre :  $M_S = 32 \text{ g/mol}$ .

3.1. Pour son petit-déjeuner, Joseph ajoute trois morceaux de sucre de 6 g chacun dans une tasse contenant 300 mL de thé. Le sucre est constitué principalement de glucose de formule

$C_6H_{12}O_6$ . Calculer la quantité de matière de glucose dans la tasse de thé.

3.2. Le schéma ci-dessous représente une solution C obtenue en mélangeant deux solutions aqueuses A et B contenant différents ions ( $Ba^{2+}$ ,  $Cu^{2+}$  et  $SO_4^{2-}$ ). La solution initiale A contient les ions  $Cu^{2+}$  et  $SO_4^{2-}$  et la solution initiale B contient les ions  $Ba^{2+}$  et  $SO_4^{2-}$ . Chaque sphère représente 0,20 mol de l'ion en solution.



3.2.1. Calculer la quantité de matière d'ions sulfates ( $SO_4^{2-}$ ) dans la solution C et sa quantité de matière dans les solutions initiales A et B.

3.2.2. La solution C est diluée 10 fois. Quelle est la quantité de matière d'ions  $SO_4^{2-}$  dans la nouvelle solution obtenue ? justifier votre réponse ».

L'activité 3 entraîne les apprenants au calcul des quantités de matière que refferment certaines substances chimiques et certaines solutions aqueuses. La question 3.1 traite le calcul des quantités de matière de certains composés chimiques. Les réponses attendues pour cette question sont données par le tableau 4 :

**Tableau 4**

Réponses de la question 3.1 de l'activité 3 portant sur la mobilisation du concept de quantité de matière

Nom de la molécule	Formule de la molécule	Masse molaire (g/mol)	Masse (g)	Quantité de matière (mol)
<b>Glucose</b>	$C_6H_{12}O_6$	180	12	<b>0,066</b>
<b>Sulfate d'aluminium</b>	$Al_2(SO_4)_3$	<b>342</b>	10	<b>0,029</b>
<b>Eau</b>	$H_2O$	18	<b>1000</b>	55,56

Pour arriver aux réponses contenues dans ce tableau, les apprenants doivent appliquer la formule de calcul de la quantité et de la masse molaire moléculaire d'un composé chimique. À ce sujet, ils doivent établir la relation qui lie la quantité de matière et la masse du composé. Ils doivent aussi pouvoir calculer la masse molaire moléculaire d'un composé. Ils doivent aussi mobiliser la formule de calcul de la quantité de matière pour déterminer la masse d'un composé.

La question 3.2 amène les apprenants à mobiliser la notion de quantité de matière dans une situation de vie concrète. La réponse juste attendue pour cette question est : la quantité de glucose contenue dans la tasse de thé de Joseph est  $n_{C_6H_{12}O_6} = 0,1$  mol. Pour parvenir à ce résultat, les apprenants doivent, au préalable, bien interpréter les données présentes dans l'énoncé afin de déterminer la masse totale (m) de glucose dissoute dans la tasse de thé ( $m = 3 \times 6 = 18$  g). Ils diviseront par la suite, la masse obtenue par la masse molaire moléculaire de glucose, qui doit être aussi préalablement calculée, pour trouver la quantité de matière de glucose demandée.

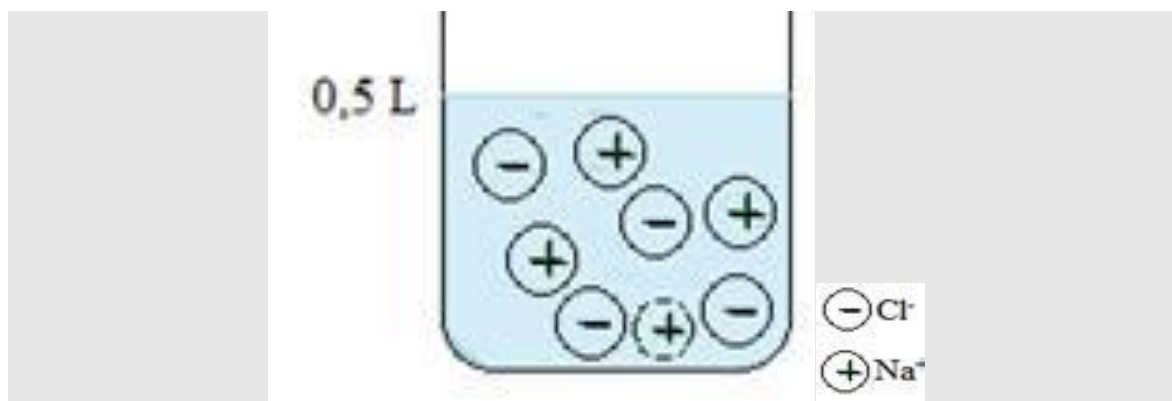
Enfin, la question 3.3 entraîne les apprenants à déterminer la quantité de matière d'un ion en solution à partir d'une représentation iconographique qui visualise les particules ioniques dans une solution au niveau sub-microscopique. Elle entraîne également les apprenants à déterminer les quantités de matière des espèces ioniques dans une solution

diluée. Les réponses justes attendues pour la question 3.3.1 sont : la quantité de matière d'ions  $\text{SO}_4^{2-}$  dans la solution C égale à 1,6 mol et la quantité de matière d'ions  $\text{SO}_4^{2-}$  dans la solution A est la même que celle contenue dans la solution B qui est égale à 0,8 mol. Pour aboutir à ces différentes réponses, les apprenants doivent bien observer le schéma et compter le nombre des sphères représentant les ions sulfates qu'ils multiplieront par 0,2 mol, qui est la quantité de matière que représente chaque sphère en solution, pour obtenir la quantité de matière d'ions  $\text{SO}_4^{2-}$  dans la solution C demandée ( $8 \times 0,2 \text{ mol} = 1,6 \text{ mol}$ ). Par contre, pour déterminer la quantité de matière d'ions  $\text{SO}_4^{2-}$  dans les solutions A et B, les apprenants peuvent mobiliser l'extensivité de la grandeur quantité de matière et la neutralité électrique des solutions A, B et C. Ainsi, comme les ions contenus dans les solutions A et B portent chacun deux charges positives et deux charges négatives, chaque solution apportera, au cours de leur mélange pour obtenir la solution C, la même quantité d'ions  $\text{SO}_4^{2-}$  pour assurer la neutralité globale de la solution C. La quantité de matière d'ions  $\text{SO}_4^{2-}$  dans la solution A sera donc égale à la quantité de matière d'ions  $\text{SO}_4^{2-}$  dans la solution B qui est égale à la quantité de matière d'ions  $\text{SO}_4^{2-}$  dans la solution C divisée par deux ( $1,6 \text{ mol}/2 = 0,8 \text{ mol}$ ). La réponse juste attendue pour la question 3.3.2 est la quantité de matière d'ions  $\text{SO}_4^{2-}$  dans la solution diluée est la même que celle contenue dans la solution C (1,6 mol). Car la dilution d'une solution n'impacte pas sur les quantités des espèces chimiques qu'elle renferme, comme il a été démontré dans l'activité 1. C'est la raison pour laquelle si  $n_i$  est la quantité de matière de la solution initiale et  $n_f$  la quantité de matière de la solution finale obtenue suite à la dilution de la solution initiale, nous pouvons établir le bilan des quantités de matière suivant :  $n_i = n_f$ .

Les activités 1, 2 et 3 préparent les apprenants à aborder les activités sur le calcul des concentrations chimiques qui suivent.

**« *Activité 4 : Calcul des concentrations des ions dans les solutions où la dissolution du soluté dans l'eau s'est faite suivant la proportion 1/1***

*4.1. Le schéma ci-dessous représente une solution aqueuse constituée d'ions chlorures ( $\text{Cl}^-$ ) et d'ions sodiums ( $\text{Na}^+$ ). Le volume de la solution est  $V = 0,5 \text{ L}$ .*



Quelles sont les concentrations (en mol/L) des ions présents dans cette solution ?

Considérez que chaque sphère représente 0,10 mol de l'ion en solution.

4.2. Une solution de volume final égal à 0,5 L est obtenue en dissolvant 0,4 mol de chlorure de sodium  $\text{NaCl(s)}$  dans un bécher contenant 0,47 L d'eau. Calculer les concentrations molaires volumiques des ions dans cette solution ».

Cette activité initie les apprenants au calcul des concentrations des espèces chimiques dans les cas des solutions où la dissolution du soluté dans l'eau s'effectue suivant la proportion 1/1. La réponse correcte attendue dans les deux cas de figure (questions 4.1 et 4.2) est  $[\text{Na}^+] = [\text{Cl}^-] = 0,8 \text{ mol/L}$ . Mais ce sont les démarches pour aboutir à cette réponse qui diffèrent.

Dans le cas de la question 4.1, pour aboutir à la réponse correcte attendue, les apprenants doivent se servir plutôt de la représentation iconographique qui modélise les ions en solution au niveau sub-microscopique et comprendre que les boules sphériques représentent les paquets d'ions dans la solution après dissolution du chlorure de sodium ( $\text{NaCl}$ ) dans l'eau. Ils doivent également comprendre que chaque type d'ion n'a qu'une seule concentration dans la solution. À cette fin, les apprenants doivent tout simplement compter le nombre total des sphères qui représentent chaque type d'ions ( $\text{Cl}^-$  et  $\text{Na}^+$ ) et multiplier par 0,1 mol pour obtenir la quantité de matière qu'ils diviseront par 0,5 L, qui est le volume de la solution, pour avoir les concentrations demandées.

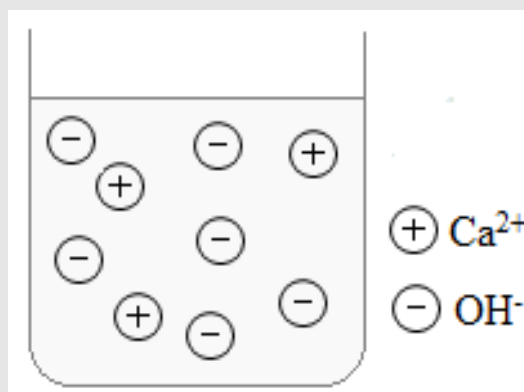
Dans le cas de la question 4.2, pour aboutir à la réponse correcte attendue, les apprenants doivent, cette fois-ci, écrire l'équation de dissolution de  $\text{NaCl}$  dans l'eau qui est :  $\text{NaCl}_{(s)} \longrightarrow \text{Na}^+_{(aq)} + \text{Cl}^-_{(aq)}$ . Par la suite, ils doivent établir correctement le bilan des quantités de matière à partir de l'équation de dissolution de  $\text{NaCl}$  dans l'eau ( $n_{\text{Na}^+} = n_{\text{Cl}^-} =$

$n_{\text{NaCl}} = 0,4 \text{ mol}$ ) qu'ils diviseront par 0,5 L, qui est le volume de la solution, pour obtenir les concentrations demandées.

L'activité quatre (4) introduit les activités centrées sur les calculs des concentrations ioniques dans des solutions où la dissolution du soluté dans l'eau ne s'effectue plus suivant la proportion 1/1 ou lorsque la dilution intervient.

**« Activité 5 : Calcul des concentrations des ions dans les solutions où la dissolution du soluté dans l'eau ne se fait plus suivant la proportion 1/1.**

5.1. Le schéma ci-dessous représente une solution aqueuse constituée d'ions hydroxyde ( $\text{OH}^-$ ) et d'ions calcium ( $\text{Ca}^{2+}$ ).



Quelles sont les concentrations (en mol/L) des ions présents dans 500 mL de cette solution ?  
Considérez que chaque sphère représente 0,10 mol de l'ion en solution.

5.2. On dissout dans l'eau une masse de 22,23 g d'hydroxyde de calcium ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) et on obtient une solution de volume égal à 0,5 L. Quelles sont les concentrations (en mol/L) des ions calciums ( $\text{Ca}^{2+}$ ) et hydroxydes ( $\text{OH}^-$ ) dans cette solution ?

5.3. Le « sulfate d'alumine solution » est un produit couramment utilisé dans le traitement des eaux. Il est obtenu en dissolvant du sulfate d'aluminium anhydre de formule  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$  et de masse molaire  $M = 342 \text{ g/mol}$  dans l'eau distillée.

Calculer les concentrations d'ions  $\text{Al}^{3+}$  et  $\text{SO}_4^{2-}$  dans 5 L de ce produit renfermant 3,5 mol/L du sulfate d'aluminium anhydre.

On donne :

- Masse molaire de l'hydrogène :  $M_{\text{H}} = 1 \text{ g/mol}$  ;
- Masse molaire du carbone :  $M_{\text{Ca}} = 40 \text{ g/mol}$  ;
- Masse molaire de l'oxygène :  $M_{\text{O}} = 16 \text{ g/mol}$  ;

- Masse molaire d'aluminium :  $M_{Al} = 27 \text{ g/mol}$  ;
- Masse molaire du soufre :  $M_S = 32 \text{ g/mol}$  ».

L'activité 5 entraîne les apprenants au processus de calcul des concentrations des espèces chimiques dans les solutions où la dissolution des solutés dans l'eau ne s'effectue plus suivant la proportion 1/1. La réponse correcte attendue est la même pour la question 5.1 et 5.2 à savoir :  $[Ca^{2+}] = 0,6 \text{ mol/L}$  et  $[OH^-] = 1,2 \text{ mol/L}$ . Cependant, ce sont les démarches pour aboutir à ce résultat qui diffèrent.

Pour aboutir à la réponse correcte attendue à la question 5.1 par exemple, les apprenants doivent se servir plutôt de la représentation iconographique qui modélise les ions en solution au niveau sub-microscopique et comprendre que les boules sphériques représentent les ions dans la solution après dissolution de l'hydroxyde de calcium  $Ca(OH)_2$  dans l'eau. Ils doivent également comprendre que chaque type d'ion n'a qu'une seule concentration dans la solution et que les coefficients stœchiométriques interviennent dans le calcul de la quantité de matière de manière implicite (le nombre des sphères d' $OH^-$  est le double de celui des sphères de  $Ca^{2+}$ ). Dans cet unique but, les apprenants doivent tout simplement compter le nombre total des sphères qui représentent chaque type d'ions ( $OH^-$  et  $Ca^{2+}$ ) et multiplier par 0,1 mol pour obtenir la quantité de matière qu'ils diviseront par 0,5 L, qui est le volume de la solution, pour avoir les concentrations demandées. Mais dans le cas de la question 5.2, pour aboutir à la réponse correcte attendue, les apprenants doivent :

- dans un premier temps, écrire et équilibrer l'équation-bilan de dissolution de  $Ca(OH)_2$  dans l'eau. Il s'agit de  $Ca(OH)_{2(s)} \longrightarrow Ca^{2+}_{(aq)} + 2OH^-_{(aq)}$ . À travers cette équation de dissolution, les apprenants doivent prendre conscience du fait que, lors de cette dissolution, une mole d'hydroxyde de calcium  $Ca(OH)_2$  libère 2 moles d'ions  $OH^-$  et une seule mole d'ions  $Ca^{2+}$  et non une mole pour chaque type d'ion (cation et anion), comme dans le cas de la dissolution du chlorure de sodium  $NaCl$  dans l'eau dans l'activité 4 ;
- par la suite, ils doivent établir correctement le bilan des quantités de matière à partir de l'équation de dissolution de  $Ca(OH)_2$  dans l'eau ( $n_{Ca^{2+}} = n_{OH^-}/2 = n_{Ca(OH)_2}$ ) et calculer la quantité de matière de chaque espèce ionique à partir de la masse du  $Ca(OH)_2$  (22,23 g) et de sa masse molaire moléculaire qu'ils doivent également calculer au préalable ;

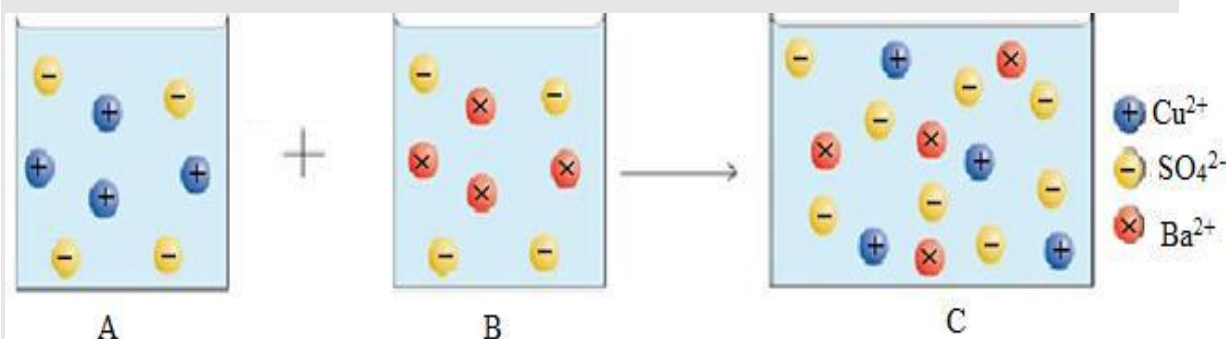
- enfin, ils doivent diviser les quantités de matière des ions  $\text{OH}^-$  et  $\text{Ca}^{2+}$  qu'ils ont calculé par 0,5 L, qui est le volume de la solution, pour obtenir les concentrations demandées.

Quant à la question 5.3, la réponse correcte attendue est :  $[\text{Al}^{3+}] = 7 \text{ mol/L}$  et  $[\text{SO}_4^{2-}] = 10,5 \text{ mol/L}$ . Pour parvenir à ce résultat, les apprenants doivent procéder de la même façon comme à la question 5.2. Ils doivent dans un premier temps, écrire et équilibrer l'équation-bilan de dissolution d' $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$  dans l'eau. Il s'agit de :

$\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3(\text{s}) \longrightarrow 2\text{Al}^{3+}_{(\text{aq})} + 3\text{SO}_4^{2-}_{(\text{aq})}$ . À travers cette équation de dissolution, ils devront remarquer par la suite que la dissolution d'une mole d' $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$  dans l'eau produit 2 moles d'ions  $\text{Al}^{3+}$  et 3 moles d'ions  $\text{SO}_4^{2-}$  pour établir correctement le bilan des quantités de matière. Ainsi, si  $n_1$  est la quantité de matière de l'ion  $\text{Al}^{3+}$  et  $n_2$  la quantité de matière de l'ion  $\text{SO}_4^{2-}$  dans le produit, le bilan des quantités de matière est :  $n_1/2 = n_2/3 = n$  ; avec  $n$  qui est la quantité de matière d' $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$  dissoute dans l'eau pour obtenir le produit. Enfin, ils doivent plutôt exprimer les concentrations des ions  $\text{Al}^{3+}$  et  $\text{SO}_4^{2-}$  en fonction de la concentration (C) d' $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$  qui est donnée dans l'énoncé, contrairement au cas de la question 5.2. C'est-à-dire  $[\text{Al}^{3+}] = n_1/V = 2xn/V = 2xC$  et  $[\text{SO}_4^{2-}] = n_2/V = 3xn/V = 3xC$ , car  $C = n/V = 3,5 \text{ mol/L}$ .

**« Activité 6 : Calcul des concentrations des espèces chimiques dans un mélange des solutions ayant les propriétés différentes.**

6.1. Une solution C est obtenue en mélangeant deux solutions aqueuses A et B contenant différents ions ( $\text{Ba}^{2+}$ ,  $\text{Cu}^{2+}$  et  $\text{SO}_4^{2-}$ ) comme l'indique le schéma ci-dessous. Le volume de chaque solution A et B est de 500 mL.



Déterminer les concentrations des ions  $\text{Ba}^{2+}$ ,  $\text{Cu}^{2+}$  et  $\text{SO}_4^{2-}$  dans la solution C. Considérer que chaque sphère représentant l'ion en solution vaut 0,05 mol.



6.2. On mélange 500 mL d'une solution de sulfate de cuivre ( $\text{CuSO}_4$ ) de concentration égale à 0,4 mol/L avec 500 mL d'une solution de sulfate de baryum ( $\text{BaSO}_4$ ) de concentration égale à 0,4 mol/L.

Déterminer les concentrations molaires des ions dans la solution finale obtenue.

6.3. On mélange 350 mL d'une solution de NaCl de concentration égale à 1,66 mol/L avec 150 mL d'une solution de NaCl de concentration égale à 0,89 mol/L.

Quelles sont les concentrations molaires des ions dans la solution finale obtenue ?

On donne :

- Masse molaire du chlore :  $M_{\text{Cl}} = 35,5 \text{ g/mol}$  ;
- Masse molaire du sodium :  $M_{\text{Na}} = 23 \text{ g/mol}$  ;
- Masse molaire du baryum :  $M_{\text{Ba}} = 137,3 \text{ g/mol}$  ;
- Masse molaire du cuivre :  $M_{\text{Cu}} = 63,5 \text{ g/mol}$  ;
- Masse molaire du soufre :  $M_{\text{S}} = 32 \text{ g/mol}$  ».

L'activité 6 entraîne les apprenants à mobiliser le caractère intensif de la grandeur concentration chimique pour déterminer les concentrations des espèces chimiques dans un mélange de deux ou de plusieurs solutions n'ayant pas les mêmes caractéristiques. La réponse correcte attendue pour la question 6.1 et 6.2 est la même :  $[\text{Ba}^{2+}] = [\text{Cu}^{2+}] = 0,2 \text{ mol/L}$  et  $[\text{SO}_4^{2-}] = 0,4 \text{ mol/L}$ , mais ce sont plutôt les démarches pour aboutir aux résultats qui diffèrent.

Pour aboutir à la réponse correcte attendue à la question 6.1 par exemple, les apprenants doivent prendre conscience à travers les représentations iconographiques des ions  $\text{Ba}^{2+}$ ,  $\text{Cu}^{2+}$  et  $\text{SO}_4^{2-}$  dans les solutions A, B et C que ces ions dans la solution C proviennent de deux solutions filles A et B. Ils doivent regrouper, à cet effet, toutes les espèces ioniques de même nature et déterminer leurs quantités de matière dans la solution C en multipliant le nombre des sphères représentant chaque espèce ionique par 0,05 mol, qui est la quantité de matière représentée par une sphère dans la solution. Ainsi, si  $n_1$  est la quantité de matière des ions  $\text{Cu}^{2+}$ ,  $n_2$  la quantité de matière des ions  $\text{Ba}^{2+}$  et  $n_3$  la quantité de matière des ions  $\text{SO}_4^{2-}$  dans la solution C, alors  $n_1 = n_2 = 4 \times 0,05 = 0,2 \text{ mol}$  et  $n_3 = 8 \times 0,05 = 0,4 \text{ mol}$ . Une fois que les quantités de matière des ions  $\text{Ba}^{2+}$ ,  $\text{Cu}^{2+}$  et  $\text{SO}_4^{2-}$  sont calculées, les apprenants doivent les diviser par 1 L, qui est le volume de la solution C ( $V_C = V_A + V_B$ ), pour trouver les concentrations demandées.

Quant à la question 6.2, pour aboutir à la réponse correcte attendue, les apprenants doivent :

- d'abord écrire et équilibrer correctement les équations des dissolutions de  $\text{BaSO}_4$  et de  $\text{CuSO}_4$  dans l'eau pour connaître la provenance des espèces ioniques  $\text{Ba}^{2+}$ ,  $\text{Cu}^{2+}$  et  $\text{SO}_4^{2-}$  dans la solution finale obtenue. Il s'agit de :  

$$\text{BaSO}_4(s) \longrightarrow \text{Ba}^{2+}_{(aq)} + \text{SO}_4^{2-}_{(aq)} \text{ et } \text{CuSO}_4(s) \longrightarrow \text{Cu}^{2+}_{(aq)} + \text{SO}_4^{2-}_{(aq)} ;$$
- ensuite, regrouper toutes les espèces ioniques de même nature provenant de deux solutions et déterminer leurs quantités de matière dans la solution finale obtenue. De cette façon, les équations des dissolutions précédentes montrent que les ions  $\text{SO}_4^{2-}$  dans la solution finale proviennent de la dissolution de  $\text{BaSO}_4$  dans l'eau et de la dissolution de  $\text{CuSO}_4$  dans l'eau. Tandis que les ions  $\text{Ba}^{2+}$  proviennent uniquement de la dissolution de  $\text{BaSO}_4$  dans l'eau et les ions  $\text{Cu}^{2+}$  proviennent uniquement aussi de la dissolution de  $\text{CuSO}_4$  dans l'eau. Leurs quantités de matière dans la solution finale obtenue seront respectivement  $n_{\text{Cu}^{2+}} = 0,4 \times 0,5 = 0,2 \text{ mol}$ ,  $n_{\text{Ba}^{2+}} = 0,4 \times 0,5 = 0,2 \text{ mol}$  et  $n_{\text{SO}_4^{2-}} = (0,4 \times 0,5) + (0,4 \times 0,5) = 0,4 \text{ mol}$  ;
- enfin, calculer les concentrations des ions  $\text{Ba}^{2+}$ ,  $\text{Cu}^{2+}$  et  $\text{SO}_4^{2-}$  dans la solution finale demandées en divisant les différentes quantités de matières des ions par le volume finale de la solution ( $500 \text{ mL} + 500 \text{ mL} = 1000 \text{ mL}$  ou  $1 \text{ L}$ ). Il s'agit de :  $[\text{Ba}^{2+}] = 0,2/1 = 0,2 \text{ mol/L}$  ;  $[\text{Cu}^{2+}] = 0,2/1 = 0,2 \text{ mol/L}$  et  $[\text{SO}_4^{2-}] = 0,4/1 = 0,4 \text{ mol/L}$ .

Pour la question 6.3, la réponse correcte attendue est  $[\text{Cl}^-] = [\text{Na}^+] = 1,42 \text{ mol/L}$ . Pour aboutir à cette réponse, les apprenants doivent procéder de la même façon comme à la question 6.2. Ils doivent dans un premier temps écrire la ou les équation(s) de dissolution de  $\text{NaCl}$  dans l'eau pour connaître la provenance des espèces ioniques  $\text{Cl}^-$  et  $\text{Na}^+$  dans la solution finale obtenue. Il s'agit de  $\text{NaCl}_{(s)} \longrightarrow \text{Cl}^-_{(aq)} + \text{Na}^+_{(aq)}$ . Dans un second temps, ils doivent déterminer les quantités de matière des ions  $\text{Cl}^-$  et  $\text{Na}^+$  dans chaque solution fille et les additionner pour obtenir leurs quantités de matière dans la solution finale obtenue ( $n_{\text{Cl}^-} = n_{\text{Na}^+} = (0,35 \times 1,66) + (0,15 \times 0,89) = 0,71 \text{ mol}$ ). Enfin, calculer les concentrations des ions  $\text{Cl}^-$  et  $\text{Na}^+$  dans la solution finale en divisant les quantités de matière trouvées par  $0,5 \text{ L}$  qui est le volume de la solution finale obtenue ( $[\text{Cl}^-] = [\text{Na}^+] = 0,71/0,5 = 1,42 \text{ mol/L}$ ).

**« Activité 7 : Calcul des concentrations des espèces chimiques dans les solutions obtenues en additionnant ou en divisant d'autres solutions de même nature.**

7.1. Un chef de famille décide de partager une bouteille (1,25 L) de jus Grenadine à ses trois enfants âgés respectivement de 5 ans, 8 ans et 10 ans. Chaque enfant dispose d'un verre de 0,5 L. Le verre de l'enfant de 5 ans est rempli au tiers de son volume, celui de l'enfant de 8 ans au trois-quarts de son volume et le verre de l'enfant de 10 ans est entièrement rempli. Sur la bouteille de jus, on lit :

- sucre..... 94 g/L
- sel.....0,07 g/L
- énergie...377 kcal/L

7.1.1. Sachant que le sucre en question est principalement le glucose de formule  $C_6H_{12}O_6$ , déterminer la concentration massique du sucre dans chaque verre et conclure.

7.1.2. L'aîné consomme la moitié du jus contenu dans son verre et il vide complètement son reste dans le verre de jus de son cadet encore intact. Déterminer la nouvelle concentration massique du glucose dans le verre du cadet et conclure.

7.2. Sur une bouteille d'eau minérale remplie de marque Surpermont (1,5 L) ouverte et posée sur une table, on lit :

- calcium ( $Ca^{2+}$ ).....30 mg/L
- chlorure ( $Cl^-$ ).....1,3 mg/L
- potassium ( $K^+$ ).....3,8 mg/L
- pH.....7,1

Par inadvertance, elle est renversée et s'est vidée de son contenu à moitié.

Déterminer en mg/L les concentrations des espèces ioniques dans l'eau qui reste dans la bouteille.

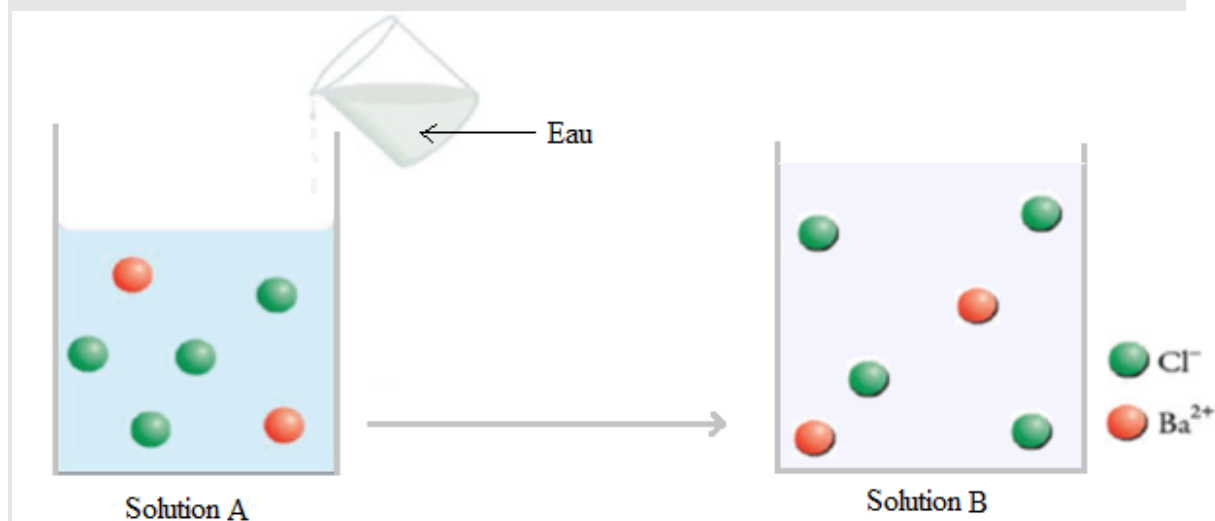
On donne :  $M_{Ca} = 40,1 \text{ g/mol}$  et  $M_K = 39,1 \text{ g/mol}$  ».

L'activité 7 entraîne également les apprenants à mobiliser le caractère intensif de la grandeur concentration chimique pour déterminer les concentrations des espèces chimiques dans les différents volumes de solutions obtenues en divisant une solution mère, ou dans une solution mère obtenue en additionnant deux ou plusieurs volumes de solutions ayant les mêmes caractéristiques sans faire des calculs numériques. La réponse correcte attendue pour la question 7.1.1 est donc  $[C_6H_{12}O_6] = 94 \text{ g/L}$  dans chaque verre. Car la division d'une solution en plusieurs volumes de solutions ne fait pas augmenter ou diminuer la

concentration de la solution ou les concentrations des espèces chimiques dans la solution étant donné que la quantité de matière et le volume de la solution dont elle dépend varient de la même façon au cours de ce processus. Quant à la question 7.1.2, la nouvelle concentration massique du glucose dans le verre du cadet est toujours  $[C_6H_{12}O_6] = 94 \text{ g/L}$ . Car l'addition des solutions de mêmes caractéristiques (même concentration chimique, même soluté, et même solvant) ne fait pas également diminuer ou augmenter la concentration de la solution ou les concentrations des espèces chimiques dans la solution, vu que la quantité de matière et le volume de la solution dont elle dépend varient similairement au cours de ce processus. Cette justification est aussi valable pour la question 7.2 où la réponse correcte attendue est : les concentrations des ions dans l'eau restante dans la bouteille sont les mêmes que les concentrations des ions dans la bouteille d'eau pleine. C'est-à-dire  $[Ca^{2+}] = 30 \text{ mg/L}$  ;  $[Cl^-] = 1,3 \text{ mg/L}$  et  $[K^+] = 3,8 \text{ mg/L}$  dans l'eau qui reste dans la bouteille.

« **Activité 8 : Calcul des concentrations des espèces chimiques dans une solution diluée**

8.1. Une solution B est obtenue en ajoutant 200 mL d'eau dans 500 mL d'une solution aqueuse de chlorure de baryum (solution A) comme l'indique le schéma ci-dessous.



Calculer les concentrations (en mol/L) des ions  $Ba^{2+}$  et  $Cl^-$  dans les deux solutions A et B et conclure. Considérer que chaque sphère représente 0,10 mol de l'ion en solution.

8.2. On dissout dans l'eau une masse de 41,66 g de chlorure de baryum ( $BaCl_2$ ) et on obtient une solution de volume égal à 0,50 L. On ajoute dans cette solution un volume d'eau égal à 0,20 L.

*Quelles sont les concentrations (en mol/L) des ions  $Ba^{2+}$  et  $Cl^-$  dans la solution finale obtenue ?*

*On donne :  $M_{Cl} = 35,5 \text{ g/mol}$  et  $M_{Ba} = 137,3 \text{ g/mol}$  ».*

L'activité 8 entraîne les apprenants au calcul des concentrations des ions dans une solution diluée. Les réponses correctes attendues pour la question 8.1 sont :  $[Ba^{2+}] = 0,4 \text{ mol/L}$  et  $[Cl^-] = 0,8 \text{ mol/L}$  dans la solution A et  $[Ba^{2+}] = 0,285 \text{ mol/L}$  et  $[Cl^-] = 0,57 \text{ mol/L}$  dans la solution B. Lorsque nous comparons les concentrations des ions  $Ba^{2+}$  et des ions  $Cl^-$  dans les solutions A et B, nous constatons que leurs concentrations ont diminué dans la solution B. Nous pouvons donc conclure que la dilution n'impacte pas la quantité de matière, mais elle fait baisser plutôt la concentration d'une solution ainsi que les concentrations des espèces chimiques qu'elle renferme, puisque le volume de la solution B finale va augmenter après ajout de l'eau dans la solution initiale A. Pour parvenir à ces résultats, les apprenants devront se servir des représentations iconographiques des ions  $Ba^{2+}$  et  $Cl^-$  dans les solutions A et B pour déterminer les quantités de matière de ces ions dans chacune de ces solutions avant de procéder aux calculs des concentrations ioniques demandées. Il s'agit de multiplier le nombre des sphères représentant chaque espèce ionique par 0,1 mol, qui est la quantité de matière représentée par une sphère dans chaque solution, qu'ils diviseront par 0,5 L pour la solution A et 0,7 L pour la solution B pour avoir les concentrations demandées. Plus précisément dit, dans la solution A :  $[Ba^{2+}] = 2 \times 0,1 / 0,5 = 0,4 \text{ mol/L}$  et  $[Cl^-] = 4 \times 0,1 / 0,5 = 0,8 \text{ mol/L}$  ; et dans la solution B :  $[Ba^{2+}] = 2 \times 0,1 / 0,7 = 0,285 \text{ mol/L}$  et  $[Cl^-] = 4 \times 0,1 / 0,7 = 0,57 \text{ mol/L}$ .

Pour ce qui est de la question 8.2, la réponse correcte attendue est :  $[Ba^{2+}] = 0,285 \text{ mol/L}$  et  $[Cl^-] = 0,571 \text{ mol/L}$ . Pour aboutir à cette réponse, les apprenants doivent :

- dans un premier temps, écrire et équilibrer l'équation-bilan de dissolution de  $BaCl_2$  dans l'eau. Il s'agit de  $BaCl_{2(s)} \longrightarrow Ba^{2+}_{(aq)} + 2Cl^-_{(aq)}$ . À travers cette équation de dissolution, les apprenants doivent prendre conscience du fait que, lors de cette dissolution, une mole de  $BaCl_2$  libère 2 moles d'ions  $Cl^-$  et une seule mole d'ions  $Ba^{2+}$ . En outre, ils doivent également prendre conscience qu'il s'agit d'une solution diluée, dont le volume final égal à la somme du volume de la solution initiale et du volume d'eau ajoutée ( $V = 0,5 \text{ L} + 0,2 \text{ L} = 0,7 \text{ L}$ ) ;
- par la suite, ils doivent établir correctement le bilan des quantités de matière à partir de l'équation de dissolution de  $BaCl_2$  dans l'eau ( $n_{Ba^{2+}} = n_{Cl^-} / 2 = n_{BaCl_2}$ ) et calculer la

quantité de matière de chaque espèce ionique à partir de la masse du  $\text{BaCl}_2$  (41,66 g) et de sa masse molaire moléculaire qu'ils doivent préalablement calculer (208,3 g/mol). Plus précisément dit,  $n_{\text{Ba}^{2+}} = n_{\text{BaCl}_2} = 41,66/208,3 = 0,2$  mol et  $n_{\text{Cl}^-} = 2 \times n_{\text{BaCl}_2} = 2 \times 41,66/208,3 = 0,4$  mol.

- Pour terminer, ils doivent diviser les quantités de matière des ions  $\text{OH}^-$  et  $\text{Ca}^{2+}$  qu'ils ont calculé par 0,7 L, qui est le volume de la solution finale, pour obtenir les concentrations demandées ( $[\text{Ba}^{2+}] = 0,2/0,7 = 0,285$  mol/L et  $[\text{Cl}^-] = 0,4/0,7 = 0,571$  mol/L).

### 3.2.2. Description du déroulement de l'apprentissage au sein du groupe d'intervention et au sein du groupe témoin

Dans le cadre de la présente recherche, rappelons que les participants, qui éprouvent des difficultés à déterminer correctement la concentration d'une espèce chimique dans une solution, choisis pour la phase d'expérimentation et qui sont assignés au groupe d'intervention ont bénéficié un apprentissage basé sur les conceptions prévalentes. Ceux qui sont plutôt assignés au groupe témoin ont bénéficié, à leur tour, un apprentissage basé uniquement sur le conflit cognitif.

#### ➤ Description du déroulement de l'apprentissage basé sur le modèle de prévalence conceptuelle

Rappelons que le modèle de prévalence conceptuelle recommande d'assurer au préalable la disponibilité des conceptions scientifiques des concepts que l'on désire faire acquérir et prévaloir chez les apprenants. Il recommande également d'instaurer chez les apprenants les réflexes du contrôle inhibiteur qui leur permettent de résister à l'emploi de certaines de leurs conceptions dans les contextes où elles s'avèrent infructueuses. Enfin, ce modèle recommande d'automatiser les réflexes inhibiteurs et la mobilisation des conceptions désirées en les étendant davantage dans d'autres contextes similaires pour qu'elles prévalent de manière naturelle même hors du cadre scolaire.

Ainsi, l'apprentissage basé sur le modèle de prévalence conceptuelle conduit par le chercheur lui-même et par un autre enseignant de chimie en service au Lycée de Tello s'est déroulé en trois séances de cours. Chaque séance a durée 1 h 30 min et elle s'est déroulée de la manière suivante :

- **Séance 1** : Après avoir préalablement remis la fiche d'activités décrite précédemment à chaque apprenant, le concept de concentration d'une espèce chimique en solution,

ainsi que les notions élémentaires qui encadrent son apprentissage, sont d'abord enseignés aux apprenants. Au cours de cet enseignement, les activités qui nécessitent l'application directe du cours sont exécutées par les apprenants. Il s'agit des activités 1, 2, 3 et 4 contenues dans la fiche d'activités remise aux apprenants sous la supervision de l'enseignant. Le but est de rendre la conception scientifique de la concentration d'une espèce chimique en solution disponible auprès des apprenants.

- **Séance 2** : l'enseignant choisit une activité parmi les activités 5, 6, 7 et 8 de la fiche d'activité et les élèves, regroupés en petits groupes de trois, sont invités à répondre par écrit en illustrant comment ils ont procédé sur une feuille. Cette activité permet à l'enseignant de s'assurer que tous les élèves travaillent et n'ont pas de problèmes de compréhension des consignes dans l'énoncé. L'enseignant récupère les productions des élèves et il demande à quelques élèves volontaires d'expliquer les stratégies qu'ils ont utilisées pour répondre aux questions. Leurs réponses sont discutées par l'ensemble des élèves de la classe dans le but de créer un conflit cognitif chez ces derniers. Il apporte l'amendement à ces différentes stratégies proposées par les apprenants en mettant en évidence la stratégie pertinente. Pour conclure la séance, l'enseignant met en évidence les pièges à éviter lors de la résolution de l'activité en utilisant les alertes verbales telles que : « **Attention ! Dans ce type d'exercice, il y a un piège. Le piège, c'est de calculer la concentration sans...** ». Par exemple, si l'enseignant choisit l'activité 5, les alertes sont : « **Attention ! Dans la question 5.1, le piège, c'est de calculer les concentrations molaires des ions  $\text{OH}^-$  et  $\text{Ca}^{2+}$  sans avoir au préalable déterminé leur quantité de matière dans la solution, car 0,1 mol présente dans l'énoncé est plutôt la quantité de matière qu'une sphère ionique représente dans la solution et non la quantité de matière totale de l'espèce ionique dans ladite solution** » et « **dans les questions 5.2 et 5.3, le piège, c'est de calculer les différentes concentrations des ions dans les solutions sans tenir compte des coefficients stœchiométriques présents dans les équation-bilans des dissolutions des solides ioniques dans l'eau et du volume de la solution** ». Mais, si l'enseignant choisit plutôt l'activité 6. En plus des pièges identifiés dans l'activité 5 que les élèves doivent éviter ou inhiber, l'autre piège qu'ils doivent éviter, « **c'est de calculer les concentrations ioniques dans un mélange des solutions (solution C par exemple) sans tenir compte qu'ils proviennent des solutions différentes (solution A et solution B par exemple)** ». Par conséquent, les stratégies pertinentes à faire prévaloir dans le contexte de l'activité pour déterminer correctement les concentrations demandées sont : « **L'addition des quantités de matière des espèces**

**ioniques dans les solutions initiales pour obtenir leurs quantités de matière dans la solution finale** » et « **L'addition des volumes des solutions initiales pour obtenir le volume de la solution finale** » lorsque ces solutions initiales sont mélangées. Par contre, si c'est l'activité 7 qui est choisie, en plus des pièges supra mentionnés qu'il faut éviter, les autres pièges à éviter sont : « **La division des concentrations des espèces chimiques dans la solution initiale pour obtenir leurs concentrations dans une solution obtenue suite à la division de cette solution initiale** » ; et « **La multiplication ou l'addition des concentrations des espèces chimiques contenues dans les solutions initiales pour obtenir leurs concentrations dans la solution finale obtenue suite à leur mélange** ». En plus de ces pièges, les apprenants doivent à cette occasion inhiber l'heuristique selon laquelle : « **Des valeurs numériques dans une question impliquent automatiquement les calculs numériques dans sa réponse** » qui n'est plus pertinente dans le contexte de l'activité 7. Cela pour faire prévaloir la stratégie pertinente basée sur la mobilisation du caractère intensif de la grandeur concentration chimique selon laquelle : « **L'addition ou la division des solutions de même solvant, de même soluté et de même concentration chimique n'impacte pas sur la concentration desdites solutions ou sur les concentrations des espèces chimiques qu'elles renferment** ». Enfin, si l'enseignant choisit plutôt l'activité 8, le piège à éviter, « **c'est de calculer la concentration d'une espèce chimique dans une solution diluée sans tenir compte du volume final de la solution obtenue** ». Par conséquent, les apprenants doivent faire prévaloir la stratégie qui consiste à « **additionner le volume de la solution initiale avec le volume d'eau ajouté pour obtenir le volume de la solution finale obtenue avant de procéder au calcul des concentrations des espèces chimiques qu'elle contient** ». Pour boucler la séance, chaque élève note sur sa fiche ces alertes qui serviront de repère pour traiter les autres exercices dans le but de rendre conscient et inhiber les stratégies non-pertinentes qui mènent à des réponses fausses.

- **Séance 3** : lors de cette dernière séance, chaque élève travaille avec sa fiche. Il doit appliquer la même méthodologie des séances précédentes pour résoudre les autres activités de la fiche d'activités qui n'ont pas été traitées en classe. La correction est faite collectivement en explicitant les pièges qu'il fallait éviter. Enfin, d'autres activités sont proposées aux apprenants dans le but d'automatiser la démarche.



### ➤ **Description du déroulement de l'apprentissage basé sur le conflit cognitif**

L'apprentissage basé sur le conflit cognitif est mené simultanément par deux autres enseignants de chimie en service au Lycée classique de Foumban et au Complexe institut la référence. Sa pédagogie est semblable à celle de l'enseignement basé sur la prévalence conceptuelle. Il s'est également déroulé en trois séances de cours. Mais la différence avec l'apprentissage basé sur les conceptions prévalentes est que l'enseignant débute son cours en proposant une situation conceptuellement problématique (qui est dans le cadre de la présente, une activité choisie sur la fiche d'activités décrite précédemment) à résoudre par l'apprenant dans le but de créer un conflit cognitif chez ce dernier. Le conflit cognitif créé dans ce cas vise plutôt à attaquer ou à combattre la ou les conception(s) non pertinente(s) présente(s) chez l'apprenant. En plus, l'enseignant n'évoque jamais le mot « piège » (pas d'alerte verbale pour attirer l'attention des apprenants sur les pièges à éviter) et il concentre ses interventions pédagogiques sur la bonne façon de faire pour résoudre le problème.

#### **3.2.3. Collecte des données du post-test**

Après l'implantation de ces deux types d'apprentissage que nous venons de décrire et qui s'est déroulée entre janvier et mi-février 2021, le même questionnaire utilisé à la phase du pré-test dans lequel nous avons éliminé<sup>55</sup> la huitième question a été de nouveau remis au début du mois de mars de la même année aux participants qui ont subi ces apprentissages. Dans ce questionnaire, les élèves doivent de nouveau opérer au premier niveau, un choix parmi les réponses qui leur sont proposées pour chacune des questions en encerclant la lettre qui correspond à la bonne réponse. Par la suite, ils doivent également de nouveau justifier ou exprimer librement, au deuxième niveau, le raisonnement qui a conduit au choix fait au premier niveau. Enfin, ils doivent de nouveau indiquer au troisième niveau le degré de confiance qu'ils accordent à leurs choix ainsi qu'à leurs justifications. Pour le faire, ils disposent, comme au pré-test, de 50 min au maximum pour répondre au questionnaire où ils doivent eux-mêmes lire et répondre directement par écrit sur les feuilles dudit questionnaire.

---

<sup>55</sup> La huitième question est éliminée dans le questionnaire du post-test parce qu'elle vise à déterminer l'origine des connaissances que les apprenants mobilisent pour répondre au questionnaire, et à l'issue de la phase du pré-test de la présente recherche, une réponse a été déjà fournie à cet effet.

## **4. Méthode d'analyse des données**

### **4.1. Analyse des données du prétest**

À l'issue de la phase du pré-test, les questionnaires répondus par les élèves interrogés ont été dépouillés. Dans le cadre de ce dépouillement, les questionnaires dans lesquels au moins 3 questions sur les 7 questions centrées sur la concentration d'une espèce chimique en solution ne sont pas entièrement répondues ont été éliminés pour la suite de l'analyse. Autrement dit, les questionnaires dans lesquels les trois paliers d'au moins de 3 questions centrées sur la concentration d'une espèce chimique en solution ne sont pas entièrement répondues ne sont pas retenues pour la suite de l'analyse. Nous avons éliminé ces questionnaires parce qu'ils ne nous donnent pas les informations pouvant aider à catégoriser les causes des raisonnements qui conduisent aux réponses fausses que proposent les participants.

Les données issues des questionnaires retenus après ce dépouillement ont été analysées suivant la grille catégorielle du tableau 5 ci-dessous que nous avons élaborée. Cette grille est inspirée de la technique d'analyse utilisée par Şen et Yilmaz (2017) lorsqu'ils ont étudié la compréhension conceptuelle de la liaison chimique par les élèves turques du secondaire.

Tableau 5

*Grille d'analyse des données*

Type des réponses	Paliers des questions			Nombre d'élèves par niveau			total	Pourcentage (%)
	Palier 1	Palier 2	Palier 3	2 <sup>de</sup> C	1 <sup>ère</sup> C et D	T <sup>le</sup> C et D		
<b>Réponse juste</b>	Correct	Correct	Sûr					
	Correct	Correct	Pas sûr					
<b>Réponse fausse liée à la présence d'une conception alternative</b>	Incorrect	Incorrect	Sûr					
	Incorrect	Incorrect/ Correct	Pas sûr					
<b>Réponse fausse liée à un manque de connaissances</b>	Correct	Incorrect	Pas sûr					
	Incorrect/ Correct/ Absence de réponse	Absence de justification	Pas sûr/Sûr/ Absence de niveau de confiance					
<b>Réponse fausse liée à un mauvais agencement conceptuel</b>	Correct	Incorrect	Sûr					
	Incorrect	Correct	Sûr					

Selon cette grille, une réponse sera considérée comme juste pour une question, en dehors de la huitième question, si l'élève répond correctement au premier et au deuxième palier et déclare au troisième palier qu'il est sûr de ses réponses. C'est-à-dire si la réponse choisie au premier palier de la question est correcte, la justification qui l'accompagne au deuxième palier est également pertinente ou correcte et il est sûr des réponses qu'il a proposées au premier et au deuxième palier. Dans le cas contraire, elle sera considérée comme fausse. Les réponses des participants qui ont également répondu correctement aux premier et deuxième paliers, mais ont déclaré qu'ils n'étaient pas sûrs de leurs réponses au troisième palier ont été exceptionnellement considérées comme juste. Car nous avons supposé qu'ils manquaient tout simplement de confiance dans leurs réponses.

Dans le cas d'analyse des réponses fausses, étant donné qu'elles peuvent être dues à plusieurs types de raisonnement, seuls les critères liés à la présence des conceptions alternatives dans la mémoire des apprenants, à un manque de connaissances, ou à un mauvais agencement conceptuel ont été prises en compte. Car dans le cadre de cette thèse, l'objectif du pré-test n'est pas d'étudier profondément les mécanismes de raisonnement qui conduisent à ces réponses fausses, mais d'identifier, d'une part, les difficultés les plus fréquentes rencontrées par les élèves ainsi que leurs origines lorsqu'ils résolvent les situations conceptuellement problématiques qui nécessitent la mobilisation de la concentration d'une espèce chimique en solution et la maîtrise des notions pivots qui organisent son apprentissage. D'autre part, il s'agit d'identifier aussi les apprenants qui éprouvent ces difficultés, plus particulièrement celles qui sont liées aux conceptions alternatives puisqu'elles sont les plus difficiles à remédier comme nous avons montré dans la première partie, pour étudier l'impact de la remédiation impliquant les conceptions prévalentes auprès d'eux. Ainsi, une réponse fausse sera due à :

- la présence d'une conception alternative dans la mémoire de l'élève si le choix qu'il opère au premier palier est incorrect et le raisonnement qu'il propose au deuxième palier pour justifier ce choix est également incorrect (non-pertinent) et il déclare au troisième niveau qu'il est sûr de sa réponse et de sa justification ;
- un manque de connaissances conceptuelles si l'élève opère un bon ou un mauvais choix de réponse au premier palier et il propose une justification incorrecte ou non pertinente au deuxième palier, mais signifie au troisième palier qu'il n'est pas sûr de sa réponse et de sa justification. De même, un manque de connaissances sera aussi constaté si l'élève opère un mauvais choix au premier palier, mais propose une

justification, présumément incorrecte au deuxième palier et déclare au troisième palier qu'il n'est pas sûr de ses réponses. Pour une question, un manque de connaissances sera également constaté lorsque le participant donne une réponse correcte au premier, mais ne justifie pas sa réponse au deuxième palier même s'il déclare qu'il est sûr ou pas sûr de sa réponse. Exceptionnellement, dans le cadre de notre analyse, une question non répondue dans les questionnaires retenus sera attribuée à un manque de connaissances, car nous supposons que les interrogés ne disposent pas des ressources cognitives nécessaires pour formuler une réponse ;

- un mauvais agencement conceptuel lorsque l'élève choisit une bonne ou mauvaise réponse au premier palier, mais propose au deuxième palier un raisonnement approximativement correct ou incorrect dans lequel il a mal agencé les concepts appropriés pour justifier son choix et déclare au troisième palier qu'il est sûr de sa réponse.

L'analyse des productions des apprenants a été réalisée avec l'aide de deux doctorants de didactique de la chimie et enseignants des sciences physiques dans les lycées et collèges du Cameroun. Ils font également partie du laboratoire de didactique des sciences expérimentales (LARDESE) basé à l'École normale supérieure de Yaoundé et dirigé par le professeur Ayina Bouni qui est un des promoteurs de la présente thèse. Au cours de ladite analyse, nous avons regroupé les résultats des questions par thème. Ainsi, les résultats des questions Q1 et Q3, qui traitent directement la détermination de la concentration d'une espèce chimique en solution lorsqu'une substance chimique est dissoute dans l'eau, sont analysés et discutés de façon croisée. Les résultats des questions Q2, Q5, Q6 et Q7, qui traitent à leur tour le caractère intensif de la grandeur concentration d'une espèce chimique en solution, sont également analysés et discutés de façon croisée. Il s'agit de la détermination de la concentration d'une espèce chimique dans une solution mère obtenue après mélange de deux ou de plusieurs solutions et de la détermination de la concentration d'une espèce chimique dans les solutions obtenues en divisant une solution mère. Enfin, les résultats de la question Q4 (qui est centrée sur la détermination de la concentration d'une espèce chimique dans une solution diluée) et de la question Q8 (qui traite l'origine des connaissances utilisées par les participants pour répondre au questionnaire) sont analysés et interprétés indépendamment.

Enfin, les fréquences des différentes réponses par items ont été calculées à l'aide du programme Microsoft Excel 2013. Dans ces calculs, nous n'avons pas pris en compte le

niveau scolaire (2<sup>de</sup> C ; 1<sup>er</sup> C et D et T<sup>le</sup> C et D) où se trouvent les participants, puisque notre objectif est d'identifier de façon générale les difficultés fréquentes que ces derniers rencontrent lorsqu'ils conceptualisent ou mobilisent la concentration d'une espèce chimique en solution.

#### **4.2. Analyse des données du post-test**

À l'issue de la phase du post-test, les questionnaires dans lesquelles les trois paliers des questions que compte le questionnaire ne sont pas entièrement répondus n'ont pas été retenus pour la suite de l'analyse. Ces questionnaires ont été éliminés parce qu'ils ne fournissent pas les informations pour juger si la réponse ainsi que le raisonnement que proposent les participants sont pertinents ou non-pertinents. Tout comme à la phase du pré-test, la réponse à une question est considérée comme juste, si l'élève répond correctement au premier et au deuxième palier et déclare au troisième palier qu'il est sûr de ses réponses. C'est-à-dire si la réponse choisie au premier palier de la question est correcte, la justification qui l'accompagne au deuxième palier est également pertinente ou correcte et il est sûr des réponses qu'il a proposées au premier et au deuxième palier. Dans le cas contraire, elle sera considérée comme fausse. Les réponses des participants qui ont également répondu correctement aux premier et deuxième paliers, mais ont déclaré qu'ils n'étaient pas sûrs de leurs réponses au troisième palier ont été exceptionnellement considérées comme juste. Car nous avons présumé qu'ils manquaient tout simplement de confiance dans leurs réponses.

Pour évaluer l'impact d'un apprentissage basé sur le modèle de prévalence conceptuelle sur les difficultés rencontrées par les apprenants lorsqu'ils déterminent la concentration d'une espèce chimique en solution aqueuse, nous nous sommes basés sur la technique utilisée par Willame (2017) dans une étude similaire à la nôtre. Il s'agit de calculer les gains conceptuels par question ou par élève. Le gain conceptuel représente la variation des scores entre le pré-test et le post-test. Et pour déterminer le gain conceptuel par question par exemple, la chercheuse propose de calculer la fréquence de réponses incorrectes avant l'activité de remédiation qui deviennent correctes après ladite activité (Willame, 2017). De cette façon, dans le cadre de la présente recherche, nous avons déterminé dans un premier temps, le gain conceptuel par question dans le groupe témoin et dans le groupe expérimental en procédant de la même façon. Dans un second temps, nous avons calculé la moyenne du gain conceptuel par question au sein de chaque groupe afin de les comparer pour identifier

le groupe qui enregistre le plus de gain possible et valider ou invalider notre deuxième hypothèse secondaire de recherche.

Pour compléter notre analyse, la vérification du seuil de significativité par rapport à la différence de performance entre les deux groupes a été faite grâce au test Z (voir annexe). Nous avons opté pour le test Z, parce que c'est un test statique qui permet de déterminer si les moyennes des deux ensembles de données diffèrent l'une de l'autre. De plus, c'est un test statistique qui s'applique lorsque la population au sein de chaque groupe de comparaison est supérieure à 30 participants. Ce qui est le cas dans le cadre de la présente recherche où chaque groupe (groupe témoin et groupe d'intervention) compte 60 élèves.

En somme, nous avons présenté principalement dans ce chapitre les techniques de collecte et d'analyse des données utilisées dans le cadre de la présente recherche. Les résultats obtenus sont présentés et discutés au prochain chapitre.

## **CHAPITRE 4 : PRÉSENTATION ET DISCUSSION DES RÉSULTATS**



Ce quatrième chapitre présente l'ensemble des résultats obtenus relatifs aux questions soulevées par la présente recherche ainsi que leur interprétation et leur discussion. Il présente également les propositions que nous avons faites pour améliorer le processus d'enseignement-apprentissage des concepts en chimie au travers des résultats obtenus dans le cadre de cette recherche.

## **1. Mortalité expérimentale**

Rappelons qu'à la phase du pré-test, les questionnaires ont été distribués à 528 élèves des classes de 2<sup>nd</sup>e C, 1<sup>re</sup> C et D et T<sup>le</sup> C et D des Lycées et Collèges privés d'enseignement général francophone du Cameroun. Parmi ceux-ci, 464 ont répondu au moins à trois questions sur les sept questions centrées sur la concentration d'une espèce chimique en solution. Soit un taux de mortalité expérimentale de 12,12 %. Les interrogés qui n'ont pas répondu entièrement à au moins trois questions sur les sept questions centrées sur la concentration d'une espèce chimique en solution du questionnaire du pré-test sont uniformément repartis dans les établissements choisis dans le cadre de cette étude. Dans la suite, seules les données des 464 participants sont présentées et discutées.

De plus, à l'issue du dépouillement des questionnaires de la phase du post-test, sur les 60 élèves du groupe expérimental qui ont subi l'apprentissage basé sur les conceptions prévalentes, 51 élèves ont répondu entièrement aux questions du questionnaire du post-test. Sur les 60 élèves du groupe témoin qui ont subi, à leur tour, l'apprentissage basé sur le conflit cognitif, 53 élèves ont également répondu entièrement aux questions du questionnaire du post-test. Pour harmoniser les effectifs au sein de deux groupes, nous avons élimé deux questionnaires du groupe témoin qui n'étaient pas entièrement répondues. Soit un taux de mortalité expérimentale de 15 % pour chaque groupe. Nous présenterons et discuterons uniquement par la suite, les données des participants retenus dans chaque groupe d'étude. Soient 51 élèves pour le groupe expérimental et 51 élèves pour le groupe témoin.

## **2. Résultats des questions de la phase du pré-test**

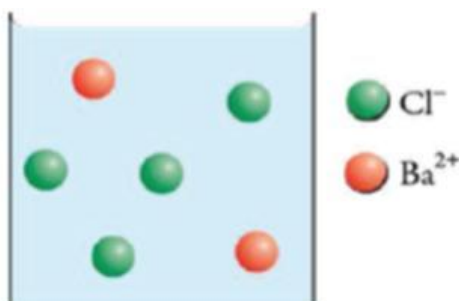
Comme nous avons mentionné au niveau de la méthodologie (partie 4.1) les résultats des questions sont regroupés par thème.

### **2.1. Résultats des questions traitant la détermination de la concentration ionique dans une solution obtenue en dissolvant une substance ionique dans l'eau**

Il s'agit des résultats des questions Q1 et Q3.

### 2.1.1. Résultats de la question Q1 du pré-test

La question Q1 du pré-test est formulée de la manière suivante : « *Le schéma ci-dessous représente une solution aqueuse constituée d'ions chlorures ( $\text{Cl}^-$ ) et d'ions baryums ( $\text{Ba}^{2+}$ ). Le volume de la solution est de 0,20 L.*



<p>1.1) Quelles sont les concentrations (en mol/L) des ions dans cette solution ? Considérez que chaque sphère représente 0,10 mol de l'ion en solution.</p>	<p>a) <math>[\text{Cl}^-] = 0,50 \text{ mol/L}</math> et <math>[\text{Ba}^{2+}] = 0,50 \text{ mol/L}</math>  b) <math>[\text{Cl}^-] = 2 \text{ mol/L}</math> et <math>[\text{Ba}^{2+}] = 1 \text{ mol/L}</math>  c) <math>[\text{Cl}^-] = 0,4 \text{ mol/L}</math> et <math>[\text{Ba}^{2+}] = 0,2 \text{ mol/L}</math>  d) <math>[\text{Cl}^-] = 4 \text{ mol/L}</math> et <math>[\text{Ba}^{2+}] = 2 \text{ mol/L}</math>  e) Autre réponse à préciser.....</p>
<p>1.2) Justifier votre réponse :</p>	
<p>1.3) Confiance accordée à votre réponse :</p>	<p>a) Sûre  b) Pas sûre »</p>

Comme nous avons montré au niveau de l'analyse a priori dans le chapitre sur la méthodologie, il est demandé aux élèves interrogés de déterminer les concentrations des ions chlorure et baryum dans la solution en se servant d'une représentation iconographique des ions en solution. La réponse correcte est la proposition b avec une justification pertinente et être sûr ou pas sûr de sa réponse. Le tableau 6 donne une synthèse des réponses apportées à cette première question (Q1) du pré-test.

**Tableau 6**

*Synthèse des réponses des participants à la question Q1 du pré-test*

Type des réponses	Nombre d'élèves par niveau			Total	Pourcentage (%)
	2 <sup>de</sup> C	1 <sup>ère</sup> C et D	T <sup>le</sup> C et D		
<b>Réponse juste</b>	68	117	96	281	60,56
<b>Réponse fausse liée à la présence d'une conception alternative</b>	27	49	50	126	27,16
<b>Réponse fausse liée à un manque de connaissances</b>	24	20	08	52	11,21
<b>Réponse fausse liée à un mauvais agencement conceptuel</b>	00	04	01	05	01,08
<b>Total</b>	119	190	155	464	100

Les résultats du tableau 4 montrent que plus de la moitié des participants (60,56 %) ont répondu correctement à cette première question contre 39,44 % qui ont répondu de façon erronée. Lorsque nous avons analysé les raisonnements des participants qui conduisent aux réponses fausses qu'ils ont choisies pour cette question ainsi que le niveau de confiance qu'ils accordent à leurs réponses, il ressort que :

- 27,16 % ont des conceptions alternatives sur le concept de concentration ionique ;
- 12,29 % ont un manque de connaissances conceptuelles ou agencent inadéquatement les concepts liés à la concentration ionique qu'ils ont acquis. Parmi les participants faisant partie de cette dernière catégorie, 11,21 % ne disposent pas des ressources cognitives suffisantes (manque de connaissances) sur la notion de concentration d'une espèce chimique en solution pouvant leur permettre de répondre correctement à cette question contre une infime partie (environ 1 %) qui disposent de ces ressources, mais ne les coordonnent pas correctement lorsqu'ils formulent la réponse.

Au cours de cette analyse, parmi les raisons qui conduisent au choix des réponses fausses, le plus fréquent (plus de 70 %) lié aux conceptions alternatives quel que soit le niveau d'étude en chimie des participants est celui qui conduit au choix de la réponse fausse (a). Il s'agit de :  $[Cl^-] = [Ba^{2+}] = C = n/V = 0,1/0,2 = 0,5 \text{ mol/L}$  comme le montre l'extrait de la figure 31.

**Figure 31**

Exemple de raisonnement lié aux conceptions alternatives qui conduit au choix de la réponse fausse (a) pour la question Q1 du pré-test.

<p>1.1) Quelles sont les concentrations (en mol/L) des ions présents dans cette solution. Considérez que chaque sphère représente 0,10 mol de l'ion en solution.</p>	<p>a) <math>[Cl^-] = 0,50 \text{ mol/L}</math> et <math>[Ba^{2+}] = 0,50 \text{ mol/L}</math>          b) <math>[Cl^-] = 2 \text{ mol/L}</math> et <math>[Ba^{2+}] = 1 \text{ mol/L}</math>          c) <math>[Cl^-] = 0,4 \text{ mol/L}</math> et <math>[Ba^{2+}] = 0,2 \text{ mol/L}</math>          d) <math>[Cl^-] = 4 \text{ mol/L}</math> et <math>[Ba^{2+}] = 2 \text{ mol/L}</math>          e) Autre réponse à préciser.....</p>
<p>1.2) Justifier votre réponse:</p> <p>Comme l'on fait que <math>C = \frac{n}{V}</math> et étant donné qu'ils ont la même quantité de matière et sont dans un même volume de solution on a donc :</p> $C = \frac{n}{V} \Rightarrow [Cl^-] = [Ba^{2+}] = \frac{0,10}{0,20} = 0,5 \text{ mol/L}$	
<p>1.3) Confiance accordée à votre réponse:</p>	<p>a) Sûre          b) Pas sûre</p>

Dans cette réponse, nous notons que les élèves qui raisonnent de la sorte ont conceptualisé la notion de la concentration chimique au niveau macroscopique (concentration d'une solution), mais ils sont incapables de faire fonctionner sa formule ( $C = n/V$ ) lorsqu'il s'agit de déterminer les concentrations des espèces ioniques en solution (niveau microscopique). Car ils ont des difficultés pour déterminer la quantité de matière de chaque espèce ionique en solution à partir de la représentation iconographique proposée. Ainsi, bien que plus de la moitié des interrogés a répondu correctement à cette question

grâce à la représentation iconographique qui modélise les ions dans la solution après dissolution totale du chlorure de baryum dans l'eau, ce mode de raisonnement montre que certains élèves continuent à penser que la quantité de matière des ions baryums ( $\text{Ba}^{2+}$ ) est égale à la quantité de matière des ions chlorures ( $\text{Cl}^-$ ). Ils raisonnent sans prendre en compte le nombre des boules de chaque type d'ions qui représentent le coefficient stœchiométrique souvent présent dans les équations de dissolution des composés ioniques. Nous confirmons ainsi les résultats obtenus par Grandillet et Le Maréchal (2003) : une mauvaise conceptualisation de la quantité de matière conduit au calcul erroné de la concentration d'une espèce chimique dans une solution.

Un autre raisonnement assez récurrent (environ 22 %) lié toujours à la présence des conceptions alternatives que nous avons également relevés et qui conduit à la formulation d'une autre mauvaise réponse est celui qui mène au choix de la réponse (c) comme l'indique l'extrait de la figure 32.

### Figure 32

Exemple de raisonnement lié aux conceptions alternatives qui conduit au choix de la réponse fautive (c) pour la question Q1 du pré-test.

1.1) Quelles sont les concentrations (en mol/L) des ions présents dans cette solution. Considérez que chaque sphère représente 0,10 mol de l'ion en solution.	a) $[\text{Cl}^-] = 0,50 \text{ mol/L}$ et $[\text{Ba}^{2+}] = 0,50 \text{ mol/L}$ b) $[\text{Cl}^-] = 2 \text{ mol/L}$ et $[\text{Ba}^{2+}] = 1 \text{ mol/L}$ <input checked="" type="radio"/> c) $[\text{Cl}^-] = 0,4 \text{ mol/L}$ et $[\text{Ba}^{2+}] = 0,2 \text{ mol/L}$ d) $[\text{Cl}^-] = 4 \text{ mol/L}$ et $[\text{Ba}^{2+}] = 2 \text{ mol/L}$ e) Autre réponse à préciser.....
1.2) Justifier votre réponse: Parce que si chaque sphère représente 0,10 mol de l'ion en solution, <del>alors</del> et comme la solution aqueuse contient ion chlorures $\text{Cl}^- = 4$ et d'ions baryum $\text{Ba}^{2+} = 2$ , alors la réponse est le (c)	
1.3) Confiance accordée à votre réponse:	<input checked="" type="radio"/> a) Sûre <input type="radio"/> b) Pas sûre

Nous notons dans ce raisonnement une confusion conceptuelle entre la quantité de matière et la concentration d'un ion en solution. Car 0,4 obtenu en multipliant 4 par 0,1 ( $4 \times 0,1$ ) représente plutôt la quantité de matière de l'ion chlorure ( $\text{Cl}^-$ ) et non sa concentration

en solution. Tout de même pour 0,2 obtenu en multipliant 2 par 0,1 ( $2 \times 0,1$ ) qui représente la quantité de matière de l'ion baryum en solution et non sa concentration. En ne prenant pas en compte le volume de la solution dans leur raisonnement, les élèves qui raisonnent de cette façon ne conçoivent pas la concentration d'une espèce chimique en solution comme une grandeur proportionnelle dépendante de la quantité de matière et du volume de la solution. De ce fait, ils ne maîtrisent ni la définition, ni la formule pour calculer la concentration d'une espèce chimique en solution. Nous confirmons une fois de plus les résultats obtenus par Grandillet et Le Maréchal (2003) : lors de la détermination de la concentration ionique, les apprenants ne tiennent pas compte du caractère intensif de cette grandeur chimique et ils raisonnent en termes d'entité-quantité. C'est-à-dire la quantité de chaque espèce ionique en solution dépend de sa grosseur ou de sa taille matérialisée dans la représentation symbolique du réseau cristallin.

Un autre type de raisonnement lié aux conceptions alternatives, mais moins rependu chez les participants (environ 6 %) a également été identifié dans les réponses des participants. Dans ce dernier par contre, la formule et le processus pour calculer la concentration d'une espèce chimique en solution sont bien mobilisés, mais il conduit plutôt à la formulation d'une mauvaise réponse (e) comme l'illustre l'extrait de la figure 33.

Figure 33

Exemple de raisonnement lié aux conceptions alternatives qui conduit au choix de la réponse fautive (e) pour la question Q1 du pré-test.

1.1) Quelles sont les concentrations (en mol/L) des ions présents dans cette solution. Considérez que chaque sphère représente 0,10 mol de l'ion en solution.	a) $[Cl^-] = 0,50 \text{ mol/L}$ et $[Ba^{2+}] = 0,50 \text{ mol/L}$ b) $[Cl^-] = 2 \text{ mol/L}$ et $[Ba^{2+}] = 1 \text{ mol/L}$ c) $[Cl^-] = 0,4 \text{ mol/L}$ et $[Ba^{2+}] = 0,2 \text{ mol/L}$ d) $[Cl^-] = 4 \text{ mol/L}$ et $[Ba^{2+}] = 2 \text{ mol/L}$ e) Autre réponse à préciser.....
1.2) Justifier votre réponse:  $BaCl_2 \rightarrow Ba^{2+} + 2Cl^-$ $n_{BaCl_2} = n_{Ba^{2+}} = \frac{m}{M}$ $\frac{n_{BaCl_2}}{V} = \frac{n_{Ba^{2+}}}{V} = \frac{n_{Cl^-}}{2V}$ $C = [Ba^{2+}] = [Cl^-]$ $[Ba^{2+}] = C = \frac{n}{V} = \frac{0,10}{0,100} = 1,0 \text{ mol.l}^{-1}$	De même $[Cl^-] = 2 \times [Ba^{2+}] = 2 \times 0,5 = 1 \text{ mol.l}^{-1}$
1.3) Confiance accordée à votre réponse:	a) <input checked="" type="radio"/> Sûre b) <input type="radio"/> Pas sûre

Les élèves qui raisonnent de cette façon ont également des difficultés pour déterminer la quantité de matière de chaque espèce ionique en solution à partir de la représentation iconographique proposée. Ils considèrent dans leurs calculs que la quantité de matière du chlorure de baryum dissout est « 0,1 mol ». Or, dans l'énoncé de la question, 0,1 mol représente plutôt la quantité de matière associée à chaque sphère ionique modélisée en solution.

Ces modes de raisonnement montrent que la plupart des élèves raisonnent en puisant plutôt leur inspiration dans leur cadre routinier interprétatif selon lequel dans un exercice, dès qu'il y a la quantité de matière et le volume, on procède directement au calcul de la concentration chimique sans vérifier s'il s'agit bel et bien de la quantité de matière de l'espèce chimique dont on veut déterminer la concentration dans la solution. Cela montre que les apprenants qui mènent ces raisonnements sont incapables de résister à leur habitude



interprétative et leur automatisme afin de faire prévaloir la démarche qui conduit à la bonne réponse de cette question.

Les raisonnements conduisant aux choix des réponses fausses opérés par les participants liés aux conceptions alternatives qui viennent d'être décrits sont aussi prédominants chez les élèves interrogés qui manifestent un manque de connaissances. La différence est qu'ils raisonnent pareillement, mais ils signifient qu'ils ne sont pas sûrs de leur réponse ou qu'ils ne peuvent pas calculer les concentrations demandées comme l'indique l'extrait de la figure 34.

### Figure 34

Exemple de raisonnement lié à un manque de connaissances qui conduit au choix de la réponse fausse (c) pour la question Q1 du pré-test.

1.1) Quelles sont les concentrations (en mol/L) des ions présents dans cette solution. Considérez que chaque sphère représente 0,10 mol de l'ion en solution.	a) $[\text{Cl}^-] = 0,50 \text{ mol/L}$ et $[\text{Ba}^{2+}] = 0,50 \text{ mol/L}$ b) $[\text{Cl}^-] = 2 \text{ mol/L}$ et $[\text{Ba}^{2+}] = 1 \text{ mol/L}$ <input checked="" type="radio"/> c) $[\text{Cl}^-] = 0,4 \text{ mol/L}$ et $[\text{Ba}^{2+}] = 0,2 \text{ mol/L}$ d) $[\text{Cl}^-] = 4 \text{ mol/L}$ et $[\text{Ba}^{2+}] = 2 \text{ mol/L}$ e) Autre réponse à préciser.....
1.2) Justifier votre réponse:	<p>étant donné que chaque sphère représente 0,10 mol/L en solution. Le nombre de mol de Barium (<math>\text{Ba}^{2+}</math>) = 0,2 mol et le <math>\text{Cl}^-</math> = 0,4 mol. Nous avons pas la concentration total de la solution par conséquent, je ne peux pas déterminer la concentration du chlore et du Barium.</p>
1.3) Confiance accordée à votre réponse:	<input type="radio"/> a) Sûre <input checked="" type="radio"/> b) Pas sûre

#### 2.1.2. Résultats de la question Q3 du prétest

Contrairement à la question Q1, la question Q3 est une question classique de calcul des concentrations des ions en solution à laquelle les apprenants sont habitués. Elle est formulée ainsi qu'il suit : « on dissout dans l'eau 5 g de sulfate de potassium ( $\text{K}_2\text{SO}_4$ ) et on obtient une solution de volume égal à 0,1 L.



3.1) Quelle est la concentration (en mol/L) de l'ion potassium ( $K^+$ ) dans cette solution sachant que $M_{K_2SO_4} = 174$ g/mol ?	a) $[K^+] = 0,28$ mol/L b) $[K^+] = 0,028$ mol/L c) $[K^+] = 0,57$ mol/L d) $[K^+] = 50$ mol/L e) Autre réponse à préciser.....
3.2) Justifier votre réponse :	
3.3) Confiance accordée à votre réponse :	a) Sûre b) Pas sûre »

Dans cette question, le coefficient stœchiométrique intervient explicitement dans le calcul de la concentration de l'ion potassium ( $K^+$ ) demandé. Chaque participant, comme nous avons montré au niveau de l'analyse a priori, doit être conscient qu'une mole de sulfate de potassium  $K_2SO_4$  libère 2 moles de  $K^+$  et une seule mole de  $SO_4^{2-}$  au cours de sa dissolution dans l'eau, et non une mole pour chaque type d'ion (cation et anion) comme dans le cas de la dissolution du chlorure de sodium  $NaCl$ . La réponse correcte est donc la proposition b avec une justification pertinente et être sûr ou pas sûr de sa réponse. Le tableau 7 donne une synthèse des réponses apportées à cette question Q3 du pré-test.

**Tableau 7**

*Synthèse des réponses des participants à la question Q3 du prétest*

Type des réponses	Nombre d'élèves par niveau			total	Pourcentage (%)
	2 <sup>de</sup> C	1 <sup>ère</sup> C et D	T <sup>le</sup> C et D		
Réponse juste	50	39	72	161	34,70
Réponse fausse liée à la présence d'une conception alternative	51	124	71	246	53,02
Réponse fausse liée à un manque de connaissances	14	24	09	47	10,13
Réponse fausse liée à un mauvais agencement conceptuel	04	03	03	10	2,16
<b>Total</b>	<b>119</b>	<b>190</b>	<b>155</b>	<b>464</b>	<b>100</b>

Les résultats du tableau 7 montrent que plus de la moitié des participants (65,30 %) répondent de façon erronée à la question Q3 contre 34,70 % qui répondent correctement. Ces résultats sont contraires aux résultats obtenus à la question Q1 (60,56 % des réponses correctes 39,44 % des réponses fausses). Ainsi, la question Q3 est la moins réussie par les apprenants par rapport à la question Q1. Or, dans les deux cas, il leur est demandé de déterminer les concentrations des espèces ioniques dans une solution obtenue en dissolvant une quantité bien précise de soluté dans l'eau.

L'analyse des justifications et des niveaux de confiance des participants qui choisissent les mauvaises propositions de réponse à la question Q3 révèle que :

- 53,02 % des raisonnements qui conduisent à ces mauvais choix sont liés aux conceptions alternatives que ces derniers ont sur le concept de concentration ionique et certaines notions pivots qui sont nécessaires pour sa conceptualisation ;
- 12,29 % des raisonnements qui conduisent également à ces mauvais choix sont liés à leur tour aux manques de connaissances conceptuelles sur la concentration ionique et les notions pivots qui sont nécessaires pour sa conceptualisation (10,13 %) ou aux mauvais agencements de ces notions dans leurs réponses (2,16 %).

La même analyse révèle également que parmi les raisonnements liés aux conceptions alternatives, le plus fréquent (environ 85 %) quel que soit le niveau d'étude en chimie des participants est celui qui conduit au choix de la réponse (a). Soit : «  $[K^+] = C = n/V = m/M \times V = 5/0,1 \times 174 = 0,28 \text{ mol/L}$  » comme l'illustre l'extrait de la figure 35.

Figure 35

Exemple de raisonnement lié aux conceptions alternatives conduisant au choix de la réponse fautive (a) pour la question Q3 du pré-test

3.1) Quelle est la concentration (en mol/L) de l'ion potassium ( $K^+$ ) dans cette solution sachant que la masse molaire de $K_2SO_4$ est $M_{K_2SO_4} = 174$ g/mol ?	a) $[K^+] = 0,28$ mol/L b) $[K^+] = 0,028$ mol/L c) $[K^+] = 0,57$ mol/L d) $[K^+] = 50$ mol/L e) Autre réponse à préciser.....
3.2) Justifier votre réponse: $[K^+] = 0,28$ mol/L ; car à travers les calculs j'ai trouvé : $[K^+] = \frac{m}{MV}$ <i>non</i> : $[K^+] = \frac{5}{174 \times 0,1}$ $= 0,28$ donc : $[K^+] = 0,28$ mol/L	
3.3) Confiance accordée à votre réponse	a) Sûre b) Pas sûre

Les apprenants qui raisonnent de la sorte font une confusion conceptuelle entre la concentration de la solution (niveau macroscopique) et la concentration d'une espèce chimique en solution (niveau microscopique). Ils ne prennent pas en compte dans leurs calculs, le coefficient stœchiométrique deux (2) qui est placé devant l'ion potassium dans l'équation de dissolution de  $K_2SO_4$  dans l'eau ( $K_2SO_4 \longrightarrow 2K^+ + SO_4^{2-}$ ). Par conséquent, ils ne font pas la différence entre la concentration d'une solution et la concentration d'une espèce chimique en solution, car ils raisonnent sans tenir compte de l'équation de dissolution. L'analyse profonde des productions des apprenants qui font la confusion entre la concentration d'une solution et la concentration d'une espèce chimique en solution nous amène à présumer l'existence chez ces derniers de la conception alternative selon laquelle : « Toutes les dissolutions des composés ioniques dans l'eau se font suivant la proportion 1/1 quels que soient les types d'ions qui les constituent ». En d'autres termes, la dissolution d'une mole de solide ionique dans l'eau libère une mole de cation et une mole d'anion quelle que soit la nature ou la composition du solide ionique. Par conséquent, la plupart des participants ne maîtrisent pas l'écriture et l'équilibrage de l'équation de la dissolution du sulfate de potassium dans l'eau (voir figure 36). Puisqu'ils n'ont pas conceptualisé au cours

de leur apprentissage en chimie que lors de la dissolution d'un solide ionique comme le  $K_2SO_4$  dans l'eau, une mole de cette substance produit 2 moles d'ions  $K^+$  et une mole d'ions  $SO_4^{2-}$  et non une mole pour chaque type d'ion ( $K^+$  et  $SO_4^{2-}$ ) comme dans le cas de la dissolution du chlorure de sodium  $NaCl$  dans l'eau. Probablement, c'est une des raisons pour laquelle ils raisonnent sans prendre en compte le coefficient stœchiométrique 2 qui est placé devant l'ion potassium ( $K^+$ ) dans l'équation de dissolution de  $K_2SO_4$  dans l'eau. D'où le bilan erroné des quantités de matière qu'ils établissent pour calculer la concentration de l'ion  $K^+$  comme l'indique l'extrait de la figure 36 (voir annexe C, p. 320 pour d'autres exemples). Ces résultats confirment ainsi les résultats obtenus par Chong et al. (2019) qui pensent que les élèves supposent toujours que toutes les transformations chimiques se déroulent suivant la proportion 1/1.

**Figure 36**

Exemple de raisonnement lié à la non-maîtrise de l'écriture et l'équilibrage de l'équation de la dissolution du sulfate de potassium dans l'eau conduisant au choix de la réponse fautive (a) à la question Q3 du pré-test.

3.1) Quelle est la concentration (en mol/L) de l'ion potassium ( $K^+$ ) dans cette solution sachant que la masse molaire de $K_2SO_4$ est $M_{K_2SO_4} = 174$ g/mol?	<p>a) <math>[K^+] = 0,28</math> mol/L</p> <p>b) <math>[K^+] = 0,028</math> mol/L</p> <p>c) <math>[K^+] = 0,57</math> mol/L</p> <p>d) <math>[K^+] = 50</math> mol/L</p> <p>e) Autre réponse à préciser.....</p>
3.2) Justifier votre réponse:	<p>comme la masse de (<math>K_2SO_4</math>) = 5 g et <math>V_{(K)} = 0,1</math> L</p> <p><math>M_{(K_2SO_4)} = 174</math> g/mol</p> <p>en u d'après l'équation-bilan de la mise en solution</p> $K^+ + SO_4 + H_2O \rightarrow K_2SO_4$ <p>calculons la concentration de l'ion potassium</p> $n_1 = n_2 \Rightarrow [K^+]V = \frac{m}{M}$ $\Rightarrow [K^+] = \frac{m}{M \times V}$ <p>AN: <math>[K^+] = \frac{5}{174 \times 0,1}</math></p> $[K^+] = 0,28 \text{ mol/L}$ <p>d'où <math>[K^+] = 0,28</math> mol/L</p>
3.3) Confiance accordée à votre réponse	<p>a) Sûre</p> <p>b) Pas sûre</p>

Certains (environ 2,16 % des participants) qui parviennent même à écrire et à équilibrer ladite équation ne mobilisent pas correctement le concept de concentration ionique. Ils agencent mal les concepts qu'ils ont appris dans la formulation de leur réponse (voir figure 37).

### Figure 37

Exemple de raisonnement lié à un mauvais agencement conceptuel conduisant au choix de la proposition de la réponse fausse (e) à la question Q3 du pré-test

3.1) Quelle est la concentration (en mol/L) de l'ion potassium ( $K^+$ ) dans cette solution sachant que la masse molaire de $K_2SO_4$ est $M_{K_2SO_4} = 174$ g/mol ?	a) $[K^+] = 0,28$ mol/L b) $[K^+] = 0,028$ mol/L c) $[K^+] = 0,57$ mol/L d) $[K^+] = 50$ mol/L e) Autre réponse à préciser..... 0,2 mol/L
3.2) Justifier votre réponse:	<p>* Equation de la dissolution  <math>K_2SO_4</math> en solution <math>\rightarrow 2K^+ + SO_4^{2-}</math>            D'après l'équation on a :  <math>[K_2SO_4] = c \left[ \frac{K^+}{2} \right] = [SO_4^{2-}]</math>  <math>[K^+] = 2c \Rightarrow 2 \times 0,1 = 0,2</math> mol/L  <math>[SO_4^{2-}] = c = 0,1</math> mol/L  <math>[K^+] = 2[SO_4^{2-}]</math>            * <math>c = \frac{n}{V} = \frac{5}{174} = 0,028</math> mol/L</p>
3.3) Confiance accordée à votre réponse	a) <input checked="" type="radio"/> Sûre b) <input type="radio"/> Pas sûre

Cet extrait montre que le mauvais agencement conceptuel a conduit à plusieurs confusions chez les apprenants qui raisonnent de cette façon. C'est la raison pour laquelle même lorsque la formule pour calculer la concentration de l'ion  $K^+$  est bien établie par les apprenants «  $[K^+] = 2 \times C$  », la concentration  $C$  de la solution est par la suite : soit assimilée à 0,1 L «  $C = 0,1$  mol/L » qui représente plutôt le volume de la solution dans l'énoncé ; soit assimilée à la quantité de matière ( $n = m/M$ ) «  $C = 5/174 = 0,028$  mol/L » dans l'application numérique. Or, dans l'énoncé il est bien précisé que 5 g représentent la masse de sulfate de potassium dissout dans l'eau et non sa quantité de matière  $n$  et 174 g/mol la masse molaire moléculaire de sulfate de potassium et non le volume  $V$  de la solution. Ce mode de raison qui consiste à associer des valeurs numériques incorrectes aux variables de la concentration

chimique pour effectuer rapidement les calculs a déjà été identifié par Devetak et al. (2009) et De Berg (2012) comme une des principales sources des difficultés qui empêchent la détermination correcte de la concentration chimique par les apprenants.

Cette confusion entre la quantité de matière et la concentration ionique a également été détectée chez les apprenants qui manifestent les conceptions alternatives sur la concentration ionique ainsi que les notions indispensables pour sa conceptualisation. Elle est d'autant plus accentuée chez les apprenants qui choisissent la proposition fautive b et sont sûrs de leurs réponses (près de 14 %). C'est-à-dire chez les apprenants qui raisonnent sans également prendre en compte l'équation de mise en solution de  $K_2SO_4$  dans l'eau (voir figure 38).

**Figure 38**

Exemple de raisonnement où la concentration ionique est assimilée à la quantité de matière de soluté dans une solution menant au choix de la réponse fautive b pour la question Q3 du pré-test

3.1) Quelle est la concentration (en mol/L) de l'ion potassium ( $K^+$ ) dans cette solution sachant que la masse molaire de $K_2SO_4$ est $M_{K_2SO_4} = 174$ g/mol ?	a) $[K^+] = 0,28$ mol/L b) $[K^+] = 0,028$ mol/L c) $[K^+] = 0,57$ mol/L d) $[K^+] = 50$ mol/L e) Autre réponse à préciser.....
3.2) Justifier votre réponse:	<p>On donne: <math>m_{K_2SO_4} = 5g, V = 0,1L</math></p> <p>On sait que: <math>M_{K_2SO_4} = 174 g/mol</math></p> $n = \frac{m}{M} = \frac{5}{174}$ <p><math>n = 0,028 mol/L</math></p> <p>Comme <math>n = 0,028 mol/L</math> alors <math>[K^+] = 0,028 mol/L</math></p>
3.3) Confiance accordée à votre réponse	a) Sûre ✓ b) Pas sûre

Ainsi, les apprenants qui raisonnent de la sorte ne maîtrisent ni la définition de la concentration ionique ni la formule pour la calculer. Ils ne prennent pas en compte le volume de la solution, dans leur raisonnement. Par conséquent, ils ne considèrent pas la concentration chimique et plus spécifiquement la concentration ionique comme une grandeur



proportionnelle qui dépend de la quantité de matière et du volume de la solution. Ces résultats nous permettent de confirmer les résultats obtenus par Devetak et al. (2009) et De Berg (2012) à savoir : lors de la détermination de la concentration chimique, la majorité des apprenants se concentre uniquement sur la quantité de matière de soluté et non sur la quantité de matière de soluté par unité de volume.

Enfin, tout comme à la question Q1 du pré-test, ces mêmes raisonnements liés aux conceptions alternatives conduisant aux choix des réponses fausses à la question Q3 qui viennent d'être décrits précédemment sont aussi prédominants chez les élèves interrogés qui manifestent un manque de connaissances (10,13 %) sur ladite question. La différence est qu'ils résonnent pareillement, mais en signifiant qu'ils ne sont pas sûrs de leur réponse.

### **2.1.3. Conclusion partielle pour les questions traitant la détermination de la concentration ionique dans une solution obtenue en dissolvant une substance ionique dans l'eau**

Il ressort des résultats des questions Q1 et Q3 du pré-test que plus de 65 % des participants ne parviennent pas à déterminer correctement les concentrations des espèces chimiques en solution lorsque la dissolution ne s'effectue plus suivant la proportion 1/1 (c'est-à-dire une mole de substance ionique dissoute dans l'eau libre une mole de chaque type d'ion qu'elle renferme). De plus, ils ont plus des difficultés à le faire lorsque l'exercice leur est présenté sous la forme littérale (voir question Q3). Mais lorsqu'une représentation iconographique modélisant les ions en solution est associée à la forme littérale de l'énoncé, la fréquence des bonnes réponses augmente et atteint 60 %. Ce résultat confirme ainsi la présomption de De Berg (2012) selon laquelle la représentation submicroscopique (au niveau atomique et moléculaire) des phénomènes chimiques serait plus susceptible d'améliorer la résolution de problèmes chimiques et plus particulièrement la résolution des problèmes liés à la concentration chimique.

Parmi les causes majeures des difficultés qu'éprouvent les apprenants à déterminer correctement les concentrations des espèces dans une solution identifiées, nous avons :

- l'incapacité des apprenants à faire fonctionner la formule de calcul de la concentration d'une solution ( $C = n/V$ ) lorsqu'il s'agit de déterminer les concentrations des espèces ioniques en solution. Ils ne maîtrisent pas l'écriture et l'équilibrage des équations de la dissolution des composées ioniques dans l'eau. Lorsqu'ils parviennent même à le faire, ils raisonnent dans la plupart des cas sans

prendre en compte, dans leur calcul, des coefficients stœchiométriques présents dans lesdites équations. Pour ces derniers, toutes les dissolutions des composés ioniques dans l'eau se font suivant la proportion 1/1 quels que soient les types d'ions qui les constituent ;

- la confusion conceptuelle entre la quantité de matière et la concentration d'un ion en solution, car les apprenants ne conceptualisent pas la concentration ionique, comme une grandeur proportionnelle qui dépend de la quantité de matière du soluté et du volume de la solution ;
- l'attribution des valeurs numériques incorrectes aux variables de la concentration ionique pour procéder rapidement au calcul numérique.

Ces difficultés qu'ont les apprenants à déterminer correctement les concentrations ioniques dans une solution ainsi que leurs causes corroborent les résultats de plusieurs recherches en didactique de la chimie (Adadan & Savasci , 2012 ; Calyk M., 2005 ; Raviolo et al., 2021) selon lesquels l'imbrication conceptuelle autour de la concentration chimique rendrait son apprentissage difficile pour les apprenants.

## 2.2. Résultats des questions traitant l'intensivité de la grandeur concentration d'une espèce chimique en solution.

Il s'agit des résultats des questions Q2, Q5, Q6 et Q7. Rappelons que les questions Q2, Q5 et Q6 du pré-test traitent la détermination des concentrations des espèces ioniques dans une solution obtenue après mélange de deux ou de plusieurs volumes de solution à des concentrations connues. La question Q7 traite, à son tour, la détermination des concentrations des espèces moléculaires dans différents volumes de solutions obtenus en divisant une solution initiale de concentration connue.

### 2.2.1. Résultats de la question Q2 du pré-test

Les données contenues dans le tableau 8 sont une synthèse des réponses apportées à la question Q2 du pré-test. En guise de rappel, cette question Q2 est formulée de la manière suivante : « *On mélange 0,35 L d'une solution de NaCl de concentration égale à 1,66 mol/L avec 0,15 L d'une solution de NaCl de concentration égale à 0,89 mol/L.*

2.1) Quelles sont les concentrations (en mol/L) des ions dans la solution finale obtenue ?	a) $[Cl^-] = 1,42 \text{ mol/L}$ et $[Na^+] = 1,42 \text{ mol/L}$ b) $[Cl^-] = 2,55 \text{ mol/L}$ et $[Na^+] = 2,55 \text{ mol/L}$ c) $[Cl^-] = 0,71 \text{ mol/L}$ et $[Na^+] = 0,71 \text{ mol/L}$
--	---



	d) $[Cl^-] = 0,58 \text{ mol/L}$ et $[Na^+] = 0,13 \text{ mol/L}$ e) Autre réponse à préciser.....
2.2) Justifier votre réponse :	
2.3) Confiance accordée à votre réponse :	a) Sûre b) Pas sûre »

La réponse correcte à la présente question est la proposition (a) à savoir  $[Cl^-] = 1,42 \text{ mol/L}$  et  $[Na^+] = 1,42 \text{ mol/L}$  avec une justification pertinente et être sûr ou pas de sa réponse.

**Tableau 8**

*Synthèse des réponses des participants à la question Q2 du prétest*

Type des réponses	Nombre d'élèves par niveau			total	Pourcentage (%)
	2 <sup>de</sup> C	1 <sup>ère</sup> C et D	T <sup>le</sup> C et D		
<b>Réponse juste</b>	12	8	39	59	12,72
<b>Réponse fausse liée à la présence d'une conception alternative</b>	81	127	74	282	60,76
<b>Réponse fausse liée à un manque de connaissances</b>	22	52	42	116	25
<b>Réponse fausse liée à un mauvais agencement conceptuel</b>	04	03	00	07	1,52
<b>Total</b>	119	190	155	464	100

Ces résultats montrent que plus de 80 % des participants (87,28 % plus exactement) répondent de façon erronée à la question Q2 contre 12,72 % qui répondent correctement. L'analyse des raisonnements des participants qui opèrent un mauvais choix de réponse à cette question Q2 à travers leurs justifications et le niveau de confiance que ces derniers accordent à leurs réponses révèle que :

- 60,76 % de ces participants ont des conceptions alternatives sur le concept de concentration ionique et certaines notions élémentaires fondamentales pour sa conceptualisation ;

- 25 % de ces participants ne disposent pas des ressources cognitives suffisantes (manque de connaissances) sur la notion de concentration d'une espèce chimique en solution pouvant leur permettre de répondre correctement à cette question contre une infime partie (environ 1,52 %) qui en disposent, mais ils les agencent incorrectement dans la formulation de leurs réponses.

Lorsque nous comparons ces résultats de la question Q2 aux résultats des questions Q1 et Q3 présentés précédemment, nous constatons qu'elle est la moins réussie par les participants. Soit 12,72 % de taux de réussite pour la question Q2 contre 34,70 % de taux de réussite pour la question Q3 et 60,56 % pour la question Q1. La question Q2 est également celle où les interrogés manifestent plus de conceptions alternatives (60,76 %) et de manque de connaissances conceptuelles (25 %) sur la concentration ionique comparativement aux questions Q1 (53,02 % des conceptions alternatives et 10,13 % de manque des connaissances conceptuelles) et Q3 (27,16 % des conceptions alternatives et 11,21 % de manque des connaissances conceptuelles).

L'examen des productions des participants qui opèrent des mauvais choix de réponses à la question Q2 liés aux conceptions alternatives que ces derniers ont sur la concentration ionique montre que les raisonnements les plus récurrents sont ceux qui conduisent au choix de la proposition b (57 %). L'extrait de la figure 39 est une illustration de ce mode de raisonnement.

Figure 39

Exemple de raisonnement lié aux conceptions alternatives conduisant au choix de la réponse fautive (b) à la question Q2 du pré-test

2.1) Quelles sont les concentrations (en mol/L) des ions présents dans la solution finale obtenue.	a) $[\text{Cl}^-] = 1,42 \text{ mol/L}$ et $[\text{Na}^+] = 1,42 \text{ mol/L}$ <input checked="" type="radio"/> b) $[\text{Cl}^-] = 2,55 \text{ mol/L}$ et $[\text{Na}^+] = 2,55 \text{ mol/L}$ c) $[\text{Cl}^-] = 0,71 \text{ mol/L}$ et $[\text{Na}^+] = 0,71 \text{ mol/L}$ d) $[\text{Cl}^-] = 0,58 \text{ mol/L}$ et $[\text{Na}^+] = 0,13 \text{ mol/L}$ e) Autre réponse à préciser.....
2.2) Justifier votre réponse: <p style="text-align: center;">données : <math>V = 0,35 \text{ L}</math>    <math>C = 1,66 \text{ mol/L}</math></p> <p>Sachant qu'on a "mélangé" les deux solutions ayant des concentrations différentes, alors il nous suffit d'additionner les deux concentrations pour trouver la concentration des ions présentes dans la solution finale obtenue. <math>C_1 + C_2 \Rightarrow 1,66 + 0,89 = 2,55</math> d'où <math>C = 2,55 \text{ mol/L}</math></p>	
2.3) Confiance accordée à votre réponse:	<input checked="" type="radio"/> a) Sûre <input type="radio"/> b) Pas sûre

Dans ce raisonnement, puisque plus 57 % des participants signifiant qu'ils sont sûrs de leurs réponses, nous pouvons conclure qu'il ne maîtrise pas le caractère intensif de la grandeur concentration chimique et plus spécifiquement celui de la grandeur concentration ionique. Les apprenants qui raisonnent de cette façon se réfèrent plutôt à leur cadre routinier interprétatif ou aux habitudes interprétatives. Pour ces apprenants, dès qu'on mélange deux solutions de concentration connue, on peut directement procéder au calcul de la concentration chimique de la solution ou des espèces chimiques présentes en addition les deux concentrations données comme c'est le cas avec les grandeurs extensives (la masse, le volume, la quantité de matière, etc.). Nous pouvons déduire ainsi chez ces derniers la présence d'une conception alternative selon laquelle : « *Le mélange des solutions implique l'addition des concentrations chimiques* ». Ce qui peut s'expliquer par leur incapacité à résister aux habitudes interprétatives pour s'adapter aux situations nouvelles et faire prévaloir la ou les stratégies pertinentes pour résoudre le problème. Une autre stratégie (voir annexe C, p.319) liée présumément à cette même conception alternative et conduisant aussi au choix de la proposition (b) identifiée chez les mêmes élèves est :

- les calculs, dans un premier temps, du volume total et de la concentration totale de la solution finale obtenue après le mélange «  $V_t = V_1 + V_2 = 0,35 + 0,15 = 0,5 \text{ L}$  et  $C_t = C_1 + C_2 = 1,66 + 0,89 = 2,55 \text{ mol/L}$  » ;
- le calcul, dans un second temps, de la quantité de matière totale présente dans la solution finale obtenue «  $n_t = C_t \times V_t = 0,5 \times 2,55 = 1,275 \text{ mol}$  » ;
- enfin, procéder au calcul de chaque espèce ionique présente dans la solution «  $[Cl^-] = [Na^+] = 1,275/0,5 = 2,55 \text{ mol/L}$  ».

Malheureusement, dans cette stratégie le fait d'additionner les concentrations des solutions du départ pour obtenir la concentration de la solution finale ( $C_t = C_1 + C_2 = 1,66 + 0,89 = 2,55 \text{ mol/L}$ ) a faussé le calcul de la quantité de matière totale présente dans ladite solution. Or, il était préférable de calculer dès le départ la quantité de matière totale présente dans chaque solution initiale et les additionner par la suite pour obtenir la quantité de matière totale présente dans le mélange ( $n_t = n_1 + n_2 = C_1 \times V_1 + C_2 \times V_2 = (1,66 \times 0,35) + (0,89 \times 0,15) = 0,71 \text{ mol}$ ). Ce mode de raisonnement montre une fois de plus que la présence dans la mémoire d'un apprenant de la conception alternative selon laquelle « *le mélange de deux ou de plusieurs solutions implique l'addition des concentrations chimiques* » entrave considérablement la construction du concept de concentration ionique et par extension celui de la quantité de matière.

Un autre type de raisonnement (environ 42 %) lié à l'existence des conceptions alternatives sur la concentration ionique qui a été identifié chez les participants est celui qui conduit au choix de la réponse fausse (d) comme l'indique l'extrait de la figure 40.

Figure 40

Exemple de raisonnement lié aux conceptions alternatives conduisant au choix de la réponse fautive (d) à la question Q2 du pré-test

2.1) Quelles sont les concentrations (en mol/L) des ions présents dans la solution finale obtenue.	a) $[Cl^-] = 1,42 \text{ mol/L}$ et $[Na^+] = 1,42 \text{ mol/L}$ b) $[Cl^-] = 2,55 \text{ mol/L}$ et $[Na^+] = 2,55 \text{ mol/L}$ c) $[Cl^-] = 0,71 \text{ mol/L}$ et $[Na^+] = 0,71 \text{ mol/L}$ <u>d) <math>[Cl^-] = 0,58 \text{ mol/L}</math> et <math>[Na^+] = 0,13 \text{ mol/L}</math></u> e) Autre réponse à préciser.....
2.2) Justifier votre réponse:	<p>Pour le chlore <math>[Cl^-] = C \times V</math> AN <math>[Cl^-] = 1,66 \times 0,35</math></p> <p>Pour le sodium <math>[Na^+] = C \times V</math> AN <math>[Na^+] = 0,89 \times 0,15 = 0,13</math></p> <p><math>[Na^+] = 0,13 \text{ mol/L}</math></p>
2.3) Confiance accordée à votre réponse:	a) Sûre b) Pas sûre

Les apprenants qui raisonnent de cette façon ne tiennent pas compte du volume de la solution finale dans leurs raisonnements. En plus de cela, ils font une confusion conceptuelle entre la quantité de matière et la concentration d'un ion en solution. Ils font également une confusion langagière entre l'ion chlorure  $Cl^-$  et l'élément chlore  $Cl$  en écrivant « pour le chlore ou pour le sodium... » (voir figure 40) en lieu et place de « pour l'ion chlorure ou l'ion sodium... » dans leurs justifications. Signalons que la mauvaise utilisation du langage chimique a déjà été identifiée par Willame et Snauwaert (2015) et Willame (2017) comme un obstacle pour la conceptualisation de la concentration chimique. Tout comme dans les cas des questions Q1 et Q3, la confusion, une fois de plus, entre la quantité de matière et la concentration d'une espèce chimique dans une solution confirme la non-maîtrise de la définition de la concentration ionique ainsi que la formule pour la calculer par certains apprenants. Car dans ce cas, il s'agit d'un mélange de deux volumes qui doivent automatiquement s'additionner pour donner le volume final de la solution. Or, ils ne considèrent pas la concentration chimique, plus spécifiquement la concentration ionique, comme une proportion qui dépend de la quantité de matière de l'ion en solution et du volume

de la solution. Nous présumons ainsi à travers le raisonnement de l'extrait de la figure 40, l'existence chez ces apprenants d'une autre conception alternative selon laquelle : « *Chaque solution ionique initiale apporte un seul type d'ion lorsqu'on les mélange* ». Cette conception alternative est semblable à celle identifiée par Gandillet et Le-Marechal (2003) dans une étude similaire à la nôtre. Il s'agit de la conception selon laquelle : « *La quantité de matière et la concentration chimique de la solution se partagent lors de la dissolution* ». Cela explique peut-être le fait que ces apprenants pensent que les ions chlorures  $\text{Cl}^-$  dans la solution finale proviennent de la solution de concentration 1,66 mol/L, et les ions sodiums  $\text{Na}^+$  de la solution de concentration 0,89 mol/L. D'où les calculs des concentrations des ions  $\text{Cl}^-$  et  $\text{Na}^+$  qu'ils proposent : «  $[\text{Cl}^-] = C \times V = 1,66 \times 0,35 = 0,58 \text{ mol/L}$  et  $[\text{Na}^+] = C \times V = 0,89 \times 0,15 = 0,13 \text{ mol/L}$  ».

Pour terminer, tout comme aux questions Q1 et Q3 du pré-test, ce sont les mêmes raisonnements qui viennent d'être décrits et conduisant aux choix des réponses fausses b et d qui prédominent chez les participants qui manifestent un manque de connaissances. La seule différence avec ceux qui manifestent la présence des conceptions alternatives dans leur mémoire est qu'ils n'ont peut-être pas encore codifié et archivé ces modes de pensées dans leur mémoire à long terme, car ils signifient eux-mêmes qu'ils ne sont pas sûrs de leurs réponses. En d'autres termes, ces modes de pensées sont encore en cours de stabilisation chez les élèves qui manifestent un manque de connaissances.

### 2.2.2. Résultats de la question Q5 du pré-test

La question Q5 est formulée ainsi qu'il suit : « *On mélange deux volumes égaux d'une même solution de chlorure de sodium NaCl de concentration égale à 0,10mol/L.*

5.1) <i>Quelle est la concentration (en mol/L) de l'ion chlorure (<math>\text{Cl}^-</math>) dans la solution finale obtenue ?</i>	a) $[\text{Cl}^-] = 0,20 \text{ mol/L}$ b) $[\text{Cl}^-] = 0,05 \text{ mol/L}$ c) $[\text{Cl}^-] = 0,10 \text{ g/mol}$ d) $[\text{Cl}^-] = 0.10 \text{ mol/L}$ e) <i>Autre réponse à préciser.....</i>
5.2) <i>Justifier votre réponse :</i>	
5.3) <i>Confiance accordée à votre réponse</i>	a) <i>Sûre</i> b) <i>Pas sûre</i>

La réponse juste est la proposition (d) à savoir  $[Cl^-] = 0,10 \text{ mol/L}$  avec une justification pertinente et être sûr ou pas de sa réponse.

Le tableau 9 donne une synthèse des résultats obtenus pour cette question lors de la phase du pré-test.

**Tableau 9**

*Synthèse des réponses des participants à la question Q5 du prétest*

Type des réponses	Nombre d'élèves par niveau			Total	Pourcentage (%)
	2 <sup>de</sup> C	1 <sup>ère</sup> C et D	T <sup>le</sup> C et D		
<b>Réponse juste</b>	26	51	70	147	31,68
<b>Réponse fausse liée à la présence d'une conception alternative</b>	44	85	46	175	37,72
<b>Réponse fausse liée à un manque de connaissances</b>	33	49	32	114	24,57
<b>Réponse fausse liée à un mauvais agencement conceptuel</b>	16	05	07	28	06,03
<b>Total</b>	119	190	155	464	100

Les résultats contenus dans le tableau 9 montrent que 68,32 % des participants répondent de façon erronée à la question Q5 du pré-test contre 31,68 % qui répondent correctement. Bien que son taux d'échecs soit supérieur à 60 %, elle est la mieux réussie par les participants comparativement aux résultats de la question Q2 (12,72 % de taux de réussite et 87,28 % de taux d'échecs) portant sur le même thème.

L'analyse des raisonnements des participants qui répondent de façon erronée à la question Q5 à travers les justifications et le niveau de confiance que ces derniers accordent à leurs réponses montre que :

- 37,72 % de ces participants ont des conceptions alternatives sur le concept de concentration ionique et certaines notions élémentaires nécessaires pour sa conceptualisation ;

- 24,57 % de ces participants ne disposent pas des ressources cognitives suffisantes sur la notion de concentration d'une espèce chimique en solution pouvant leur permettre de répondre correctement à cette question contre 6,02 % qui en disposent, mais ils les agencent incorrectement dans la formulation de leurs réponses.

L'analyse des productions des participants qui opèrent des mauvais choix de réponses à la question Q5 liés aux conceptions alternatives que ces derniers ont sur la concentration ionique montre que le type de raisonnement qui prédomine (66 %) est celui qui conduit au choix de la proposition (a). Il s'agit de l'addition ou de la multiplication de la concentration de la solution de chlorure de sodium par 2 comme l'indique l'extrait de la figure 41.

### Figure 41

Exemple de raisonnement lié aux conceptions alternatives conduisant au choix de la réponse fautive (a) à la question Q5 du pré-test

5.1) Quelle est la concentration (en mol/L) de l'ion chlorure (Cl <sup>-</sup> ) dans la solution finale obtenue ?	<input checked="" type="radio"/> a) [Cl <sup>-</sup> ] = 0,20 mol/L <input type="radio"/> b) [Cl <sup>-</sup> ] = 0,05 mol/L <input type="radio"/> c) [Cl <sup>-</sup> ] = 0,30 mol/L <input type="radio"/> d) [Cl <sup>-</sup> ] = 0,10 mol/L <input type="radio"/> e) Autre réponse à préciser.....
5.2) Justifier votre réponse: <p style="margin-left: 40px;">- la concentration finale de la solution est de;  <math>c = 0,10 \times 2 = 0,2 \text{ mol/L}</math></p> <p style="margin-left: 40px;">- la concentration de l'ion <math>\text{cl}^-</math> est de;  <math>\frac{c_{\text{NaCl}}}{1} = \frac{c_{\text{cl}^-}}{1} \Leftrightarrow [\text{NaCl}] = [\text{cl}^-] = 0,2 \text{ mol/L}</math></p>	
5.3) Confiance accordée à votre réponse	<input checked="" type="radio"/> a) Sûre <input type="radio"/> b) Pas sûre

La justification de l'extrait de la figure 41 montre une fois de plus que les apprenants qui raisonnent de cette façon ne maîtrisent pas le caractère intensif de la concentration chimique ou de la concentration ionique. Ces derniers font une confusion entre les grandeurs extensives (masse, volume, quantité de matière...) qui s'additionnent lors d'un mélange et des grandeurs intensives (température, pression, concentration...) qui ne s'additionnent pas lors d'un mélange. Au cours de leur apprentissage en chimie, ils n'ont pas conceptualisé que lors de l'addition des solutions de mêmes caractéristiques (même nature, même



concentration, et même volume), les deux grandeurs extensives (la quantité de matière et le volume) dont dépend la concentration augmentent de manière constante. Et par conséquent, comme la concentration est un rapport de proportion entre les deux, leur constante variation n'impacte ni sur la concentration de la solution, ni sur la concentration des espèces chimiques (ioniques dans ce cas) en solution. Ces résultats viennent ainsi confirmer l'existence chez les apprenants de la conception alternative selon laquelle : « *Le mélange des solutions implique l'addition des concentrations chimiques et l'addition des concentrations ioniques* » déjà identifiée à la question Q2 du même pré-test.

Un autre type de raisonnement toujours lié aux conceptions alternatives que les apprenants manifestent consiste à diviser la concentration de la solution par deux comme l'indique l'extrait de la figure 42. Il est aussi assez répandu (environ 34 %) et conduit au choix de la proposition b.

**Figure 42**

*Exemple de raisonnement lié aux conceptions alternatives conduisant au choix de la réponse fautive (b) à la question Q5 du pré-test*

5.1) Quelle est la concentration (en mol/L) de l'ion chlorure (Cl <sup>-</sup> ) dans la solution finale obtenue ?	a) [Cl <sup>-</sup> ] = 0,20 mol/L <b>b) [Cl<sup>-</sup>] = 0,05 mol/L</b> c) [Cl <sup>-</sup> ] = 0,30 mol/L d) [Cl <sup>-</sup> ] = 0,10 mol/L e) Autre réponse à préciser.....
5.2) Justifier votre réponse:	$\text{NaCl} \longrightarrow \text{Na}^+ + \text{Cl}^-$ <p>étant donné que la <math>[\text{Na}^+] \neq [\text{Cl}^-]</math>  <math>= [\text{NaCl}]</math> alors <math>\frac{[\text{NaCl}]}{2} = [\text{Cl}^-] = [\text{Na}^+]</math></p> <p>AN : <math>\frac{0,10}{2}</math>  <math>[\text{Cl}^-] = \underline{\underline{0,05 \text{ mol/L}}}</math></p>
5.3) Confiance accordée à votre réponse	a) Sûre ✓ b) Pas sûre

La justification de la figure 42 montre que les apprenants qui raisonnent ainsi disposent des connaissances notionnelles sur la concentration ionique complètement erronées. À travers leurs productions, il a été constaté comme à la question Q2 que la plupart de ceux qui raisonnent de cette façon pensent qu'au cours d'un mélange de plusieurs solutions

ioniques, chaque solution apporte un seul type d'ion. Par conséquent, les concentrations des ions qu'elles contiennent s'additionnent pour donner la concentration de la solution finale obtenue. C'est probablement la raison pour laquelle ils écrivent : «  $[NaCl] = [Na^+] + [Cl^-]$  ». Puisque l'énoncé parle également du mélange « *d'une même solution de chlorure sodium* », ils en déduisent que la concentration des ions chlorure  $Cl^-$  est égale à la concentration des ions sodium  $Na^+$  «  $[Na^+] = [Cl^-]$  ». Cela implique que la concentration de la solution finale obtenue qu'ils notent également par «  $[NaCl]$  » est le double de celle de l'ion chlorure  $Cl^-$  : «  $[NaCl] = [Cl^-] + [Cl^-] = 2[Cl^-]$  ». D'où l'expression finale «  $[Cl^-] = [NaCl]/2$  » qu'ils utilisent pour calculer la concentration de l'ion  $Cl^-$  demandée. Nous présumons ainsi dans ce raisonnement la présence dans la mémoire des apprenants d'une autre conception alternative selon laquelle : « *La concentration d'une substance ionique dans une solution égale la somme des concentrations des ions qu'elle referme* » qui pourrait justifier cette démarche qu'ils ont adoptée. Cette conception peut s'expliquer par l'hypothèse émise par Gandillet et Le-Marechal (2003) selon laquelle plusieurs apprenants pensent que la quantité de matière et la concentration chimique de la solution se partagent lors de la dissolution d'un composé ionique dans l'eau.

D'autres, par contre, raisonnent en attribuant arbitrairement des valeurs numériques incorrectes à la quantité de matière et au volume de la solution afin de répondre rapidement à la question posée (voir annexe C, p.321). Pour ces derniers : «  $[Cl^-] = n_{NaCl}/V = 0,1/2 = 0,05 \text{ mol/L}$  ». Dans ce raisonnement, la valeur numérique «  $0,1$  » qu'ils attribuent à la quantité de matière est en réalité plutôt la concentration de chaque solution fille mélangée. Par contre, la valeur numérique  $2$  qu'ils attribuent également au volume de la solution est liée à une mauvaise interprétation de l'expression « *deux volumes égaux* » mentionnée dans l'énoncé de la question. Cette mauvaise interprétation est probablement liée au mode de transposition souvent effectué par la plupart des enseignants de chimie et certains manuels de chimie qui consiste à définir la concentration chimique par rapport à  $1 \text{ L}$  de solution et non par rapport au volume de la solution. Ainsi, dans l'expression, « *deux volumes égaux* », le volume a été probablement remplacé par «  $1$  » par les apprenants et qu'ils les additionnent par la suite pour obtenir le volume de la solution finale ( $V = 1 \text{ L} + 1 \text{ L} = 2 \text{ L}$ ). Ladite stratégie conduisant à la réponse incorrecte qui consiste à attribuer des valeurs numériques aux variables de la formule du calcul de la concentration ionique peut aussi provenir des heuristiques ou des habitudes interprétatives. Parmi ces heuristiques, nous présumons la prégnance de celle selon laquelle : « *Des valeurs numériques dans un énoncé impliquent*

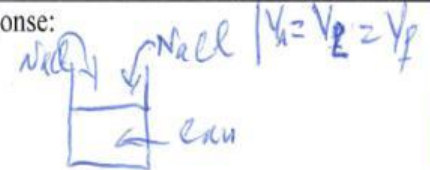
*automatiquement des calculs numériques dans la réponse* ». Cette heuristique a également été identifiée par Willame (2017) et Raviolo et al. (2021) comme une source des difficultés qui empêche les apprenants de déterminer correctement la concentration d'une solution. Willame (2017) pensent que le recours permanent des élèves à ladite heuristique est dû au fait qu'il n'est pas dans les habitudes enseignantes de donner des énoncés contenant des valeurs numériques sans qu'un calcul ne doive aboutir. Au travers de ces résultats, nous pensons comme Raviolo et al. (2021) qu'il faut éviter de trop s'appuyer sur les mécaniques algorithmiques et numériques lors des résolutions des problèmes conceptuels sur la concentration ionique qui empêchent les apprenants de voir au-delà des chiffres.

Tout comme les questions dont les résultats sont précédemment présentés, ce sont presque les raisonnements qui viennent d'être décrits et conduisant aux choix des réponses fausses a et b qui prédominent chez les participants qui manifestent un manque de connaissances. La seule différence avec ceux qui manifestent plutôt la présence des conceptions alternatives est qu'ils n'ont peut-être pas encore codifié et archivé ces modes de pensées dans leur mémoire à long terme, car ils doutent de leurs réponses en signifiant qu'ils ne sont pas sûrs.

Enfin, l'analyse des productions des participants a également montré que certains participants (6,03 %) qui répondent faussement à la question Q5 adoptent des démarches pertinentes pouvant conduire à la formulation de la réponse correcte. Ils disposent, cependant, des ressources cognitives sur la concentration ionique. Mais le fait qu'ils cordonnent mal dans leur raisonnement certains concepts qu'ils ont appris, aboutit plutôt à la formulation d'une réponse fausse comme l'indique l'extrait de la figure 43.

Figure 43

Exemple de raisonnement lié à un mauvais agencement conceptuel conduisant à un mauvais choix de réponse à la question Q5 du pré-test

5.1) Quelle est la concentration (en mol/L) de l'ion chlorure (Cl <sup>-</sup> ) dans la solution finale obtenue ?	a) [Cl <sup>-</sup> ] = 0,20 mol/L ✗ b) [Cl <sup>-</sup> ] = 0,05 mol/L c) [Cl <sup>-</sup> ] = 0,30 mol/L d) [Cl <sup>-</sup> ] = 0,10 mol/L ✗ e) Autre réponse à préciser.....
5.2) Justifier votre réponse:  $V_1 = V_2 = V_f$ $\text{Equation}$ $\text{NaCl} \xrightarrow{\text{eau}} \text{Na}^+ \text{Cl}^-$ $n_{\text{Cl}^-} = (n_{\text{Cl}^-})_1 + (n_{\text{Cl}^-})_2$ $[\text{Cl}^-] V_f = [\text{Cl}^-]_1 V_1 + [\text{Cl}^-]_2 V_2$	$\textcircled{c} [\text{Cl}^-] = [\text{Cl}^-]_1 + [\text{Cl}^-]_2$ $\approx 0,10 + 0,10$ $\approx 0,20 \text{ mol/L}$
5.3) Confiance accordée à votre réponse	a) Sûre ✓ b) Pas sûre

Dans la justification de la figure 43, le bilan de quantité de matière de l'ion chlorure dans le mélange est bien établi. Malheureusement, le fait de considérer que le volume final de la solution obtenue égal au volume initial de chaque solution «  $V_f = V_1 = V_2$  » a faussé les calculs qui sont opérés par la suite. Ainsi, leur incapacité à identifier la nature extensive de la variable volume de solution dans la formule de calcul de la concentration ionique, lié probablement à une mauvaise interprétation de l'expression « deux volumes égaux », a faussé les calculs de la concentration de l'ion chlorure. Car en réalité, dans le contexte de la question Q5, il s'agit d'un mélange des solutions où les volumes doivent automatiquement s'additionner comme les quantités de matières des solutions mélangées, étant donné qu'elles sont toutes les deux les grandeurs extensives.

### 2.2.3. Résultats de la question Q6 du prétest

Semblable à la question Q5, rappelons que la question Q6 est intitulée à son tour : « Soient 5 solutions aqueuses identiques (même soluté et même solvant) de concentration en ion calcium ( $\text{Ca}^{2+}$ ) égale à 0,20 mol/L. On rassemble dans un même récipient les 5 solutions.

6.1) Quelle est la concentration (en mol/L) de l'ion $Ca^{2+}$ dans la solution finale obtenue ?	a) $[Ca^{2+}] = 0,20 \text{ mol/L}$ b) $[Ca^{2+}] = 0,04 \text{ mol/L}$ c) $[Ca^{2+}] = 5 \text{ mol/L}$ d) $[Ca^{2+}] = 1 \text{ mol/L}$ e) Autre réponse à préciser.....
6.2) Justifier votre réponse :	
6.3) Confiance accordée à votre réponse :	a) Sûre b) Pas sûre »

La réponse juste à cette question est la proposition (a) à savoir  $[Ca^{2+}] = 0,20 \text{ mol/L}$ . Le tableau 10 donne une synthèse des résultats obtenus pour cette question lors de la phase du pré-test.

**Tableau 10**

*Synthèse des réponses des participants à la question Q6 du pré-test*

Type des réponses	Nombre d'élèves par niveau			Total	Pourcentage (%)
	2 <sup>de</sup> C	1 <sup>ère</sup> C et D	T <sup>le</sup> C et D		
Réponse juste	15	35	73	123	26,51
Réponse fausse liée à la présence d'une conception alternative	80	109	60	249	53,66
Réponse fausse liée à un manque de connaissances	24	43	18	85	18,32
Réponse fausse liée à un mauvais agencement conceptuel	00	03	04	07	01,51
<b>Total</b>	119	190	155	464	100

D'après les résultats contenus dans le tableau 10, 73,49 % des participants répondent de façon erronée à la question Q6 du pré-test contre 26,51 % qui répondent correctement. Lorsque nous comparons ces résultats aux résultats des questions Q2 (87,28 % de taux d'échecs et 12,72 % de taux de réussite) et Q5 (68,32 % de taux d'échecs et 31,68 % de taux de réussite), la question Q6 est la mieux réussie par les participants par rapport à la

question Q2. Mais elle est la moins réussie par rapport à la question Q5, toutes portant sur le même thème malgré que son taux d'échecs soit aussi très élevé (plus de 70 %).

Il ressort également de ce tableau que :

- 53,66 % de ces participants ont des conceptions alternatives sur le concept de concentration ionique et certaines notions élémentaires nécessaires pour sa conceptualisation ;
- 18,32 % de ces participants ne disposent pas des ressources cognitives suffisantes sur la notion de concentration d'une espèce chimique en solution pouvant leur permettre de répondre correctement à cette question contre 1,51 % qui en disposent, mais ils les agencent incorrectement dans la formulation de leurs réponses.

L'analyse des productions des participants qui opèrent des mauvais choix de réponses à la question Q6 liés aux conceptions alternatives qu'ils ont sur la concentration ionique montre que le type de raisonnement le plus répandu (85 %) est celui qui conduit au choix de la proposition (d). Similairement aux réponses de la question Q5, il s'agit de l'addition des différentes concentrations de l'ion calcium  $\text{Ca}^{2+}$  ou de sa multiplication, cette fois ci, par 5 comme l'indique l'extrait de la figure 44 (voir annexe C, p.322 pour plus d'illustration).

#### Figure 44

Exemple de raisonnement lié aux conceptions alternatives conduisant au choix de la réponse fautive (d) à la question Q6 du pré-test

6.1) Quelle est la concentration (en mol/L) de l'ion $\text{Ca}^{2+}$ dans la solution finale obtenue ?	a) $[\text{Ca}^{2+}] = 0,20 \text{ mol/L}$ b) $[\text{Ca}^{2+}] = 0,04 \text{ mol/L}$ c) $[\text{Ca}^{2+}] = 5 \text{ mol/L}$ <input checked="" type="radio"/> d) $[\text{Ca}^{2+}] = 1 \text{ mol/L}$ e) Autre réponse à préciser.....
6.2) Justifier votre réponse:	<p>Comme chaque recipient ont la même soluté et même volume la <math>[\text{Ca}^{2+}]</math> est la somme des concentration de chaque recipient. on a :</p> $[\text{Ca}^{2+}] = 0,20 + 0,20 + 0,20 + 0,20 + 0,20$ $= 1$
6.3) Confiance accordée à votre réponse	<input checked="" type="radio"/> a) Sûre <input type="radio"/> b) Pas sûre

Par contre, d'autres qui ont choisi toujours la proposition (d) utilisent la règle de 3 pour déterminer la concentration de l'ion calcium demandée comme l'illustre la figure 45.

### Figure 45

Exemple de raisonnement lié aux conceptions alternatives où la règle de trois est utilisée conduisant aux choix de la réponse fausse (d) à la question Q6 du pré-test

6.1) Quelle est la concentration (en mol/L) de l'ion $\text{Ca}^{2+}$ dans la solution finale obtenue ?	a) $[\text{Ca}^{2+}] = 0,20 \text{ mol/L}$ b) $[\text{Ca}^{2+}] = 0,04 \text{ mol/L}$ c) $[\text{Ca}^{2+}] = 5 \text{ mol/L}$ <input checked="" type="radio"/> d) $[\text{Ca}^{2+}] = 1 \text{ mol/L}$ e) Autre réponse à préciser.....
6.2) Justifier votre réponse: <p style="margin-left: 40px;">La concentration de l'ion <math>\text{Ca}^{2+}</math> est :</p> <div style="margin-left: 80px;"> <math display="block">[\text{Ca}^{2+}] \xrightarrow{1 \text{ solution}} \Sigma [\text{Ca}^{2+}]_{\text{total}} = [\text{Ca}^{2+}] \times 5</math> <math display="block">? \xrightarrow{5 \text{ solutions}} = 5 \times 0,2</math> <math display="block">[\text{Ca}^{2+}]_{\text{total}} = 1 \text{ mol/L}</math> </div>	
6.3) Confiance accordée à votre réponse	<input checked="" type="radio"/> a) Sûre <input type="radio"/> b) Pas sûre

L'extrait de la figure 45 montre que l'utilisation de la règle de trois pour calculer la concentration de l'ion calcium dans le mélange obtenu conduit également à la multiplication par 5 de la concentration de l'ion  $\text{Ca}^{2+}$  dans chaque solution fille. En posant les valeurs de l'énoncé sous forme de la règle de trois, ces apprenants cherchent à établir une proportionnalité entre ces valeurs. Cette stratégie de réponse permet de confirmer une fois de plus l'existence chez ces apprenants de la conception alternative que nous avons décelée à la question Q2 : « *Le mélange des volumes des solutions implique automatiquement l'addition des concentrations des espèces chimiques en solution* ».

Un autre type de raisonnement assez répandu chez les élèves (14 %) qui manifeste l'existence dans leur mémoire des conceptions alternatives sur la concentration ionique consiste à diviser par 5 la concentration initiale de l'ion calcium dans chaque solution fille : «  $[\text{Ca}^{2+}] = 0,20/5 = 0,04 \text{ mol/L}$  ». Ce mode de raisonnement conduit au choix de la réponse fausse b (voir annexe C, p.322). Cette stratégie de réponse montre une fois de plus que les élèves recourent permanemment à l'heuristique : « *Des valeurs numériques dans un énoncé impliquent automatiquement des calculs numériques dans la réponse* » pour répondre aux

questions liées à la concentration ionique. Malheureusement, cette stratégie ne conduit pas toujours au calcul correct de la concentration chimique.

En ce qui concerne les 18,32 % des participants qui manifestent un manque de connaissances conceptuelles sur la concentration ionique pour répondre correctement à la question Q6, ce sont presque les mêmes raisonnements conduisant aux choix des réponses fausses b et d qui viennent d'être décrits qui prédominent également chez ces derniers. La seule différence avec ceux qui manifestent plutôt la présence des conceptions alternatives est qu'ils ne sont pas sûrs de leurs réponses. Nous présumons que ces derniers n'ont pas encore codifié et archivé, c'est-à-dire stabilisé, ces modes de raisonnement dans leur mémoire à long terme.

#### 2.2.4. Résultats de la question Q7 du prétest

Rappelons également que la question Q7 est formulée ainsi qu'il suit : « Une bouteille (1,5 L) de jus Chapman contient 131 g/L de glucose ( $C_6H_{12}O_6$ ). On divise ce jus dans 3 verres de 0,5 L chacun.

<p>7.1) Quelle est la concentration (en g/L) du glucose dans chaque verre de jus ?</p> <p><math>M_{C_6H_{12}O_6} = 180 \text{ g/mol}</math></p>	<p>a) <math>[C_6H_{12}O_6] = 43,67 \text{ g/L}</math></p> <p>b) <math>[C_6H_{12}O_6] = 262 \text{ g/L}</math></p> <p>c) <math>[C_6H_{12}O_6] = 83,33 \text{ g/L}</math></p> <p>d) <math>[C_6H_{12}O_6] = 131 \text{ g/L}</math></p> <p>e) Autre réponse à préciser.....</p>
<p>7.2) Justifier votre réponse :</p>	
<p>7.3) Confiance accordée à votre réponse :</p>	<p>a) Sûre</p> <p>b) Pas sûre »</p>

La réponse juste est la proposition (d) à savoir  $[C_6H_{12}O_6] = 131 \text{ g/L}$  avec une justification pertinente et être sûr ou pas de sa réponse.

Le tableau 11 donne une synthèse des résultats obtenus pour la question Q7 de la phase du pré-test.



**Tableau 11**

*Synthèse des réponses des participants à la question Q7 du pré-test*

Type des réponses	Nombre d'élèves par niveau			Total	Pourcentage (%)
	2 <sup>de</sup> C	1 <sup>ère</sup> C et D	T <sup>le</sup> C et D		
<b>Réponse juste</b>	31	36	47	114	24,57
<b>Réponse fausse liée à la présence d'une conception alternative</b>	63	91	76	230	49,57
<b>Réponse fausse liée à un manque de connaissances</b>	25	61	26	112	24,14
<b>Réponse fausse liée à un mauvais agencement conceptuel</b>	00	02	06	08	1,72
<b>Total</b>	119	190	155	464	100

Les résultats du tableau 11 montrent que 75,47 % des participants répondent de façon erronée à la question Q6 du pré-test contre 24,57 % qui répondent correctement. La comparaison des résultats de la question Q6 aux résultats des autres questions (Q2, Q5 et Q6) du pré-test portant elles aussi sur le caractère intensif de la concentration d'une espèce chimique en solution montre qu'ils sont quasi-identiques. Néanmoins, la question Q7 est aussi la mieux réussie par les participants par rapport à la question Q2 (87,28 % de taux d'échecs et 12,72 % de taux de réussite, bien que son taux d'échec soit également bien élevé (environ 75 % d'échec).

Les résultats du tableau 11 montrent également qu'après-analyse des raisonnements des participants qui opèrent des mauvais choix de réponses à la question Q7 à travers les justifications que ces derniers proposent et du niveau de confiance qu'ils accordent à leurs réponses :

- environ 50 % des participants (49,57 % plus exactement) ont des conceptions alternatives sur le caractère intensif de la concentration d'une espèce chimique moléculaire en solution ;

- 24,14 % des participants ne disposent pas des ressources cognitives suffisamment stabilisées sur l'intensivité de la grandeur concentration d'une espèce chimique en solution pouvant leur permettre de répondre correctement à cette question contre 1,72 % des participants qui en disposent, mais ils ne les mobilisent pas correctement dans la formulation de leurs réponses.

En ce qui concerne les participants qui répondent faussement à la question Q7 à cause de l'existence chez ces derniers des conceptions alternatives sur le caractère intensif de la concentration d'une espèce moléculaire en solution, l'analyse de leur production montre que les types de raisonnement les plus répandus (90 %) sont ceux qui conduisent au choix de la proposition (a). Dans ces modes de raisonnement, certains participants divisent la concentration de glucose contenu dans 1,5 L de jus par 3 comme l'indique l'extrait de la réponse de la figure 46.

**Figure 46**

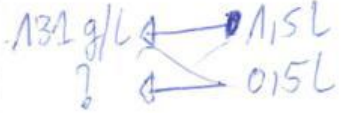
Exemple de raisonnement lié aux conceptions alternatives menant au choix de la réponse fautive (a) à la question Q7 du pré-test.

7.1) Quelle est la concentration (en g/L) du glucose dans chaque verre de jus? $M_{C_6H_{12}O_6} = 180 \text{ g/mol}$	<input checked="" type="radio"/> a) $[C_6H_{12}O_6] = 43,67 \text{ g/L}$ <input type="radio"/> b) $[C_6H_{12}O_6] = 262 \text{ g/L}$ <input type="radio"/> c) $[C_6H_{12}O_6] = 83,33 \text{ g/L}$ <input type="radio"/> d) $[C_6H_{12}O_6] = 131 \text{ g/L}$ <input type="radio"/> e) Autre réponse à préciser.....
7.2) Justifier votre réponse: <p>pour chaque verre contenant du jus on a !</p> $[C_6H_{12}O_6] = \frac{131}{3}$ $= 43,66666667$ $\approx 43,67$ <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; display: inline-block;"> <math>[C_6H_{12}O_6] = 43,67 \text{ g/L}</math> </div>	
7.3) Confiance accordée à votre réponse	<input checked="" type="radio"/> a) Sûre <input type="radio"/> b) Pas sûre

D'autres par contre utilisent plutôt la règle de trois pour aboutir à la même réponse comme dans le cas de la question Q6. Ce cas de figure est illustré par l'extrait de la réponse de la figure 47.

Figure 47

Exemple de raisonnement lié aux conceptions alternatives menant au choix de la réponse fautive (a) à la question Q7 du pré-test dans lequel la règle de trois est mobilisée.

7.1) Quelle est la concentration (en g/L) du glucose dans chaque verre de jus? $M_{C_6H_{12}O_6} = 180 \text{ g/mol}$	<input checked="" type="radio"/> a) $[C_6H_{12}O_6] = 43,67 \text{ g/L}$ <input type="radio"/> b) $[C_6H_{12}O_6] = 262 \text{ g/L}$ <input type="radio"/> c) $[C_6H_{12}O_6] = 83,33 \text{ g/L}$ <input type="radio"/> d) $[C_6H_{12}O_6] = 131 \text{ g/L}$ <input type="radio"/> e) Autre réponse à préciser.....
7.2) Justifier votre réponse: <i>On a : <math>C_{m_{C_6H_{12}O_6}} = 131 \text{ g/L}</math> dans <math>1,5 \text{ L}</math> de jus</i>  $= b \frac{131 \times 0,15}{1,5} \approx 43,667 \approx 43,67 \text{ g/L}$ $\underline{[C_6H_{12}O_6] = 43,67 \text{ g/L}}$	
7.3) Confiance accordée à votre réponse	<input checked="" type="radio"/> a) Sûre <input type="radio"/> b) Pas sûre

Ces deux modes de raisonnement montrent une fois de plus que ces participants ne maîtrisent pas le caractère intensif de la concentration chimique. Ils font une confusion entre les grandeurs extensives (masse, volume, quantité de matière...) qui se divisent lors du partage d'une solution en plusieurs volumes de solutions, et les grandeurs intensives (température, pression, concentration...) qui ne se divisent pas au cours du même processus. Ainsi les apprenants qui raisonnent de cette façon ne comprennent pas que, comme dans le cas de l'addition des solutions de mêmes caractéristiques, la division d'une solution en plusieurs solutions filles n'affecte ni la concentration chimique, ni la concentration des espèces chimiques en solution. Car les deux grandeurs extensives (masse de soluté et volume de la solution) dont dépend la concentration chimique vont baisser simultanément et de manière constante. Par conséquent, comme la concentration est un rapport de proportion entre les deux, elle ne sera pas impactée. Nous pouvons conjecturer au travers de ces raisonnements que certains élèves formulent leurs réponses en s'appuyant, soit sur la conception alternative selon laquelle : « *La division d'une solution mère en plusieurs volumes implique automatiquement la division des concentrations des espèces chimiques* ». Soit en recourant une fois de plus à l'heuristique : « *Des valeurs numériques dans une tâche cognitive impliquent automatiquement des calculs numériques dans la réponse* ». Nous confirmons les automatismes décelées par Willame (2017) dans le cadre d'une étude

similaire en Belgique : « Si le volume est divisé par deux alors la concentration doit être divisée par deux aussi » ou « Si la concentration double alors le volume doit doubler aussi ». Elle les attribue aux règles intuitives du type « Less A then less B » ou « More A then more B ». Ainsi, nous pensons comme Willame (2017) que l'emploi de ces règles intuitives par les élèves pour répondre aux questions liées à la concentration chimique montre qu'ils ne raisonnent pas toujours en se référant au concept lui-même. Ils se basent probablement sur ces règles, soit parce que la notion de l'intensivité de cette grandeur n'est pas assimilée, soit parce que ces stratégies sont rapides, moins coûteuses cognitivement et efficaces dans certains contextes auxquels ils sont habitués.

Un autre type de raisonnement (9 %) identifié chez les élèves qui manifestent l'existence dans leur mémoire des conceptions alternatives sur l'intensivité de la concentration d'une espèce chimique et conduisant au choix de la réponse fautive b est donné par la figure 48.

**Figure 48**

Exemple de raisonnement lié aux conceptions alternatives menant au choix de la réponse fautive (b) à la question Q7 du pré-test.

7.1) Quelle est la concentration (en g/L) du glucose dans chaque verre de jus? $M_{C_6H_{12}O_6} = 180 \text{ g/mol}$	a) $[C_6H_{12}O_6] = 43,67 \text{ g/L}$ <input checked="" type="radio"/> b) $[C_6H_{12}O_6] = 262 \text{ g/L}$ c) $[C_6H_{12}O_6] = 83,33 \text{ g/L}$ d) $[C_6H_{12}O_6] = 131 \text{ g/L}$ e) Autre réponse à préciser.....
7.2) Justifier votre réponse: $n = 0,15 \text{ l}$ $[C_6H_{12}O_6] = \frac{131}{0,15} = 262 \text{ g/l}$	
7.3) Confiance accordée à votre réponse	a) Sûre b) Pas sûre

Dans ce mode de raisonnement, nous notons la confusion conceptuelle entre la concentration massique d'une espèce chimique en solution et sa concentration molaire volumique. Car les participants qui raisonnent de cette façon mobilisent plutôt la formule de calcul de la concentration molaire volumique «  $[C_6H_{12}O_6] = n/V$  » en lieu et place de la

formule de la concentration massique ( $[C_6H_{12}O_6] = m/V$ ) qui donne la concentration du glucose en g/L. Nous notons également une autre confusion conceptuelle entre la quantité de matière qui s'exprime en mol et la concentration massique qui s'exprime en g/L dans l'application numérique effectuée par les apprenants. Puisqu'en réalité « 131 » qu'ils utilisent dans cette application numérique représente plutôt la concentration massique et non la quantité de matière.

Ces modes de raisonnement qui viennent d'être présentés prédominent également chez les apprenants qui manifestent plutôt un manque de connaissances conceptuelles sur la question Q7. À la seule différence que ces derniers déclarent qu'ils ne sont pas sûrs de leurs réponses. Par conséquent, ils n'ont pas encore été automatisés chez ces derniers comparativement à ceux qui manifestent la présence des conceptions alternatives qui les ont déjà automatisés. Un autre mode de raisonnement aussi fréquent lié à un manque de connaissances sur l'intensivité de la concentration d'une espèce chimique en solution identifié chez les participants est donné par la figure 49.

**Figure 49**

*Exemple de raisonnement lié à un manque de connaissances menant au choix de la réponse juste (d) à la question Q7 du pré-test.*

7.1) Quelle est la concentration (en g/L) du glucose dans chaque verre de jus? $M_{C_6H_{12}O_6} = 180 \text{ g/mol}$	a) $[C_6H_{12}O_6] = 43,67 \text{ g/L}$ b) $[C_6H_{12}O_6] = 262 \text{ g/L}$ c) $[C_6H_{12}O_6] = 83,33 \text{ g/L}$ <input checked="" type="radio"/> d) $[C_6H_{12}O_6] = 131 \text{ g/L}$ e) Autre réponse à préciser.....
7.2) Justifier votre réponse:  <i>par ce que la concentration ne change pas tant dans l'augmentation du volume d'une solution que dans la diminution de volume de cette solution</i>	
7.3) Confiance accordée à votre réponse	a) Sûre <input checked="" type="radio"/> b) Pas sûre

Bien que ce raisonnement erroné mène aux choix de la proposition juste (d) à la question Q7, nous présumons un manque de connaissances conceptuelles sur la proportionnalité de la concentration d'une espèce chimique en solution chez les apprenants. Car ces derniers

pensent que seul le volume de la solution impacte la concentration chimique lorsqu'il diminue au cours de la division d'une solution. Ils n'ont peut-être pas encore conceptualisé que la concentration d'une solution ou d'une espèce chimique en solution est le rapport entre la quantité de matière contenue dans la solution ou la quantité de matière de chaque espèce chimique en solution et le volume de la solution. Et pour cette raison, la division d'une solution n'impacte pas la concentration chimique étant donné que ce processus affecte similairement la quantité de matière et le volume de la solution. D'où le fait que la concentration du glucose dans les solutions filles soit égale à celle de solution mère.

### **2.2.5. Conclusion partielle pour les questions traitant l'intensivité de la grandeur concentration d'une espèce chimique en solution.**

Il ressort des résultats des questions Q2, Q5, Q6 et Q7 du pré-test qu'environ 70 % des participants ne parviennent pas à déterminer correctement les concentrations des espèces chimiques lorsque le caractère intensif du concept lui-même doit être mobilisé. Parmi les causes des difficultés identifiées, les principales sont :

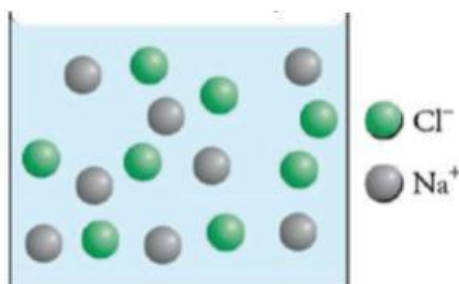
- la présence dans la mémoire des participants des conceptions alternatives selon lesquelles « *chaque solution ionique fille apporte un seul type d'ion au cours de leur mélange* » ; « *la concentration d'une substance ionique dans une solution égale la somme des concentrations des ions qu'elle referme* » ou « *la concentration ionique se divise lors du partage d'une solution en plusieurs volumes* » ;
- l'interprétation erronée des énoncés ;
- la mobilisation des heuristiques telles que « *des valeurs numériques dans un énoncé impliquent automatiquement des calculs numériques dans la réponse* » ;
- la confusion entre la concentration massique d'une espèce chimique en solution et sa concentration molaire volumique ;

Ces résultats confirment ainsi les résultats des études de Gandillet et Le-Marechal (2003), Willame (2017) et Chong et al. (2019) qui constatent que l'intensivité de la grandeur concentration chimique n'est pas un paramètre facilement assimilable par les apprenants.

## 2.3. Résultats des questions du pré-test traitant la détermination des concentrations des espèces chimiques dans une solution diluée.

### 2.3.1. Résultats de la question Q4 du prétest

Rappelons que la question Q4 est formulée ainsi qu'il suit : « *Le schéma suivant représente une solution aqueuse de NaCl de volume égal à 0,40 L. On ajoute dans cette solution 0,10 L d'eau.* »



<p>4.1) <i>Quelle est la concentration (en mol/L) de l'ion sodium (<math>\text{Na}^+</math>) dans la solution finale obtenue ? Considérez que chaque sphère représente 0,10 mol de l'ion en solution.</i></p>	<p>a) <math>[\text{Na}^+] = 0,80 \text{ mol/L}</math>            b) <math>[\text{Na}^+] = 2 \text{ mol/L}</math>            c) <math>[\text{Na}^+] = 1,6 \text{ mol/L}</math>            d) <math>[\text{Na}^+] = 16 \text{ mol/L}</math>            e) <i>Autre réponse à préciser.....</i></p>
<p>4.2) <i>Justifier votre réponse :</i></p>	
<p>4.3) <i>Confiance accordée à votre réponse :</i></p>	<p>a) <i>Sûre</i>            b) <i>Pas sûre »</i></p>

La réponse correcte à la question Q4 est la proposition (c) à savoir  $[\text{Na}^+] = 1,6 \text{ mol/L}$  avec une justification pertinente et être sûr ou pas de sa réponse.

Le tableau 12 donne une synthèse des résultats obtenus pour la question Q4 de la phase du pré-test.

**Tableau 12**

*Synthèse des réponses des participants à la question Q4 du prétest*

Type des réponses	Nombre d'élèves par niveau			Total	Pourcentage (%)
	2 <sup>de</sup> C	1 <sup>ère</sup> C et D	T <sup>le</sup> C et D		
<b>Réponse juste</b>	57	85	93	235	50,65
<b>Réponse fausse liée à la présence d'une conception alternative</b>	29	55	31	115	24,78
<b>Réponse fausse liée à un manque de connaissances</b>	29	46	31	106	22,84
<b>Réponse fausse liée à un mauvais agencement conceptuel</b>	04	04	00	08	01,73
<b>Total</b>	119	190	155	464	100

Les résultats contenus dans le tableau 12 montrent que 49,35 % des participants répondent de façon erronée à la question Q4 du pré-test contre 50,65 % qui répondent correctement. Tout comme la question Q1 (60,56 % de taux de réussite), elle est aussi la mieux réussie par les participants avec un taux de réussite de l'ordre de 50 %.

Il ressort également du tableau 12, après analyse des raisonnements des participants qui opèrent des mauvais choix de réponses à la question Q4, à travers les justifications et le niveau de confiance que ces derniers proposent et accordent à leurs réponses que :

- 24,78 % des participants ont des conceptions alternatives sur l'impact de la dilution d'une solution sur les concentrations des espèces chimiques qu'elle contient ;
- 22,24 % des participants ne disposent pas des ressources cognitives suffisamment stabilisées sur l'impact de la dilution d'une solution sur les concentrations des espèces chimiques qu'elle contient leur permettant de répondre correctement à la question Q4. 1,73 % des participants qui en disposent ne les mobilisent pas correctement lorsqu'ils formulent leurs réponses.

L'analyse des productions des apprenants qui répondent de façon incorrecte à la question Q4 à cause de la présence des conceptions alternatives sur l'impact de la dilution d'une solution sur les concentrations des espèces chimiques qu'elle contient montre que la



plupart d'entre eux (environ 65 %) raisonne par rapport au volume de la solution initiale (0,4 L). Ce mode de raisonnement conduit au choix de la réponse fautive (b) lorsque la quantité de matière a été correctement calculée comme l'indique l'extrait de la réponse de la figure 50.

### Figure 50

Exemple de raisonnement lié à la présence des conceptions alternatives menant au choix de la réponse fautive (b) à la question Q4 du pré-test.

4.1) Quelle est la concentration (en mol/L) de l'ion sodium ( $\text{Na}^+$ ) dans la solution finale obtenue ? Considérez que chaque sphère (ion en solution) représente 0,10 mol.	a) $[\text{Na}^+] = 0,80 \text{ mol/L}$ <input checked="" type="radio"/> b) $[\text{Na}^+] = 2 \text{ mol/L}$ c) $[\text{Na}^+] = 1,6 \text{ mol/L}$ d) $[\text{Na}^+] = 8 \text{ mol/L}$ e) Autre réponse à préciser.....
4.2) Justifier votre réponse: $C = \frac{n}{V} \text{ or } C = 8 \text{ atomes de } [\text{Na}^+]$ $= n \times \frac{V}{C}$ $= 8 \times \frac{0,10}{0,40}$ <u>Alors <math>[\text{Na}^+] = 2 \text{ mol/L}</math></u>	
4.3) Confiance accordée à votre réponse	<input checked="" type="radio"/> a) Sûre <input type="radio"/> b) Pas sûre

D'autres par contre (environ 30 %), raisonnent par rapport au volume d'eau ajoutée (0,1 L) lorsque la quantité de matière est correctement calculée. L'extrait de la figure 51 suivante illustre ce cas de figure.

Figure 51

Exemple de raisonnement lié à la présence des conceptions alternatives menant au choix de la réponse fautive (d) à la question Q4 du pré-test

4.1) Quelle est la concentration (en mol/L) de l'ion sodium ( $\text{Na}^+$ ) dans la solution finale obtenue ? Considérez que chaque sphère représente 0,10 mol de l'ion en solution.	a) $[\text{Na}^+] = 0,80 \text{ mol/L}$ b) $[\text{Na}^+] = 2 \text{ mol/L}$ c) $[\text{Na}^+] = 1,6 \text{ mol/L}$ d) $[\text{Na}^+] = 8 \text{ mol/L}$ ✓ e) Autre réponse à préciser.....
4.2) Justifier votre réponse: la concentration en mol/L de l'ion sodium ( $\text{Na}^+$ ) dans la solution finale obtenue est : $[\text{Na}^+] = \frac{n_{\text{Na}^+}}{V} = \frac{8 \times 0,1}{0,1} = 8$ $[\text{Na}^+] = 8 \text{ mol/L}$	
4.3) Confiance accordée à votre réponse	a) Sûre ✓ b) Pas sûre

Ces modes de raisonnement montrent que certains apprenants ont des connaissances conceptuelles sur la concentration d'une espèce chimique en solution, mais ne parviennent pas à les mobiliser correctement dans des situations conceptuellement problématiques où la dilution intervient. Lors de leur apprentissage en chimie, ils n'ont pas conceptualisé que la concentration chimique est inversement proportionnelle au volume final de la solution lorsque la quantité de matière est constante ou non constante. Nous présumons également dans ce cas, l'incapacité de ces apprenants à résister à leur habitude interprétative afin de s'adapter aux situations nouvelles. Ils sont probablement incapables d'inhiber les conceptions non-pertinentes « *volume de solution initiale (0,4 L)* » ou « *volume de solvant (0,1 L)* » qui ne marchent dans ce contexte, au profit de la conception algorithmique pertinente qui consiste à additionner les deux volumes pour trouver le volume de la solution finale ( $0,4 + 0,1 \text{ L} = 0,5 \text{ L}$ ). Mais ils recourent plutôt à l'heuristique selon laquelle « *dans un exercice, dès qu'il y a la quantité de matière et le volume, on procède directement au calcul de la concentration chimique sans vérifier s'il s'agit bel et bien du volume de la solution finale obtenue* ».

Enfin, certains (environ 3 %) qui parviennent même à activer la stratégie pertinente concernant le volume de la solution ( $0,4 + 0,1 \text{ L} = 0,5 \text{ L}$ ) n'aboutissent pas à la bonne réponse. Ces derniers divisent plutôt  $0,1 \text{ mol}$  par  $0,5 \text{ L}$  pour obtenir  $0,2 \text{ mol/L}$  comme valeur numérique de la concentration des ions sodiums  $\text{Na}^+$  en solution (voir annexe C, p.320). Or, en réalité,  $0,1 \text{ mol}$  représente la quantité de matière assimilée à chaque boule sphérique qui modélise l'ion présent dans la solution finale et il faut la multiplier par huit pour trouver la quantité de matière de  $\text{Na}^+$  avant de procéder au calcul de sa concentration dans ladite solution. Nous supposons que le fait d'utiliser  $0,1 \text{ mol}$  comme quantité de matière des ions  $\text{Na}^+$  dans la solution est lié une fois de plus à l'heuristique : « *Des valeurs numériques dans une tâche cognitive impliquent automatiquement des calculs numériques dans la réponse* ».

Bien que ces modes de raisonnement qui viennent d'être décrits soient également menés par certains apprenants qui manifestent un manque de connaissances sur l'impact de la dilution d'une solution sur les concentrations des espèces chimiques qu'elle contient, d'autres modes de raisonnement prédominent chez ces derniers. Parmi ces modes, nous avons celui qui consiste à opérer le calculer de la concentration des ions  $\text{Na}^+$  sans faire intervenir le volume de la solution comme le préconise la définition de la concentration chimique. L'extrait de réponse de la figure 52 suivante illustre ce cas.

### Figure 52

Exemple de raisonnement lié à un manque de connaissances conceptuelles menant au choix de la réponse fautive (a) à la question Q4 du pré-test

5.1) Quelle est la concentration (en mol/L) de l'ion chlorure ( $\text{Cl}^-$ ) dans la solution finale obtenue ?	<input checked="" type="radio"/> a) $[\text{Cl}^-] = 0,20 \text{ mol/L}$ <input type="radio"/> b) $[\text{Cl}^-] = 0,05 \text{ mol/L}$ <input type="radio"/> c) $[\text{Cl}^-] = 0,30 \text{ mol/L}$ <input type="radio"/> d) $[\text{Cl}^-] = 0,10 \text{ mol/L}$ <input type="radio"/> e) Autre réponse à préciser.....
5.2) Justifier votre réponse:  $[\text{Cl}^-] = 0,10 \times 2$ $[\text{Cl}^-] = 0,2 \text{ mol/L}$	
5.3) Confiance accordée à votre réponse	<input type="radio"/> a) Sûre <input checked="" type="radio"/> b) Pas sûre

Cet extrait montre que les participants qui raisonnent de cette façon ne maîtrisent pas la définition de la concentration ionique, soit la formule pour la calculer. Ils n'ont sûrement

pas de connaissances conceptuelles sur le caractère proportionnel de cette grandeur chimique qui dépend de la quantité de matière de chaque espèce chimique en solution et du volume de la solution. Par conséquent, ils assimilent dans leurs raisonnements la concentration ionique à la quantité de matière de l'espèce ionique en solution. Puisqu'en réalité, en multipliant 0,1 mol par huit, obtenir plutôt 0,8 mol d'ions  $\text{Na}^+$  qui est sa quantité de matière dans la solution et non « 0,8 mol/L ». Et pour trouver sa concentration dans la solution diluée, il faut diviser 0,8 mol par le volume de la solution diluée qui est égal 0,5 L.

### **2.3.2. Conclusion partielle pour les questions du pré-test traitant la détermination des concentrations des espèces chimiques dans une solution diluée**

Il ressort des résultats de la question Q4 du pré-test qu'environ 50 % des participants ont des difficultés pour déterminer correctement les concentrations des espèces chimiques en solution lorsque la solution où elles sont présentes est diluée. Parmi les principales causes de ces difficultés, nous avons :

- la non-prise en compte du caractère extensif du volume de la solution après l'ajout du solvant. Car la plupart raisonne soit par rapport au volume initial de la solution, soit par rapport au volume d'eau ajoutée en mobilisant permanemment des automatismes telles que la présence dans un énoncé de la quantité de matière et du volume implique directement le calcul de la concentration chimique sans vérifier s'il s'agit bel et bien du volume final de la solution ;
- la confusion entre la concentration ionique et la quantité de matière de l'espèce ionique en solution.

Ces résultats confirment les résultats obtenus par Calik (2005) ; Devetak et al. (2009) ; Adadan et Savasci (2012) qui constatent que la dilution n'est pas un concept facile à acquérir par les apprenants. Puisque la plupart des apprenants pensent également que lorsque le volume d'une solution augmente en raison de la dilution, la quantité de soluté dissous diminue.

### **2.4. Résultats des questions du prétest visant à identifier les sources des connaissances que les élèves ont utilisées pour répondre au questionnaire**

Rappelons qu'il s'agit de la question Q8 formulée en ces termes : « *Les connaissances que vous avez utilisées pour répondre à ce questionnaire ont été apprises :*

a) *À l'école*

b) *Sur Internet*

c) *Dans des livres ou revues scientifiques*

d) *Autres à préciser..... ».*

Le tableau 13 donne une synthèse des résultats obtenus pour la question Q8 de la phase du prétest.

**Tableau 13**

*Synthèse des réponses des participants à la question Q8 du pré-test*

<b>Réponses</b>	<b>a</b>	<b>b</b>	<b>c</b>	<b>d</b>
<b>Nombres des participants</b>	451	13	114	47
<b>Pourcentage (%)</b>	97,19	2,80	24,56	10,12

La possibilité pour un participant de choisir plusieurs réponses fait en sorte qu'on ait une somme de pourcentage supérieure à 100 %. Les résultats contenus dans le tableau 13 montrent que, malgré les réponses multiples, l'école reste le lieu principal où les élèves construisent leurs connaissances en chimie. Car 97 % des participants indiquent que les connaissances qu'ils ont utilisées pour répondre au questionnaire de cette recherche ont été apprises à l'école. Nous notons également le faible taux d'utilisation (27,36 %) d'autres supports tels que : internet et les livres par les élèves pour acquérir les connaissances scientifiques. Nous confirmons ainsi les résultats d'Ouasri et Ravanis (2020) selon lesquels l'école reste le principal lieu de transmissions des connaissances scientifiques, plus particulièrement des connaissances en chimie. Ainsi, à la lumière de ces résultats, nous sommes également d'avis avec Ouasri et Ravanis (2020) que les conceptions alternatives sont développées par la façon qu'un apprenant donne du sens à ce qui lui est présenté en classe en lien avec ses connaissances antérieures qui viennent principalement, en chimie, de l'enseignement. En d'autres termes, les conceptions alternatives seraient plutôt les produits des constructions mentales qu'ont faites les apprenants en s'expliquant à eux-mêmes, délibérément ou non, les nouveaux concepts. Cela peut expliquer le fait qu'une difficulté d'apprentissage soit également liée à une limitation structurelle mentale qui fait que les informations présentées à l'apprenant ne sont pas comprises par ce dernier, car ne disposant pas des ressources cognitives nécessaires pour mieux les assimiler.

## 2.5. Récapitulatif des résultats obtenus à la phase du pré-test

Rappelons que la première phase de la présente recherche avait pour but d'identifier les difficultés rencontrées par les apprenants et les causes des raisonnements qui conduisent aux réponses erronées qu'ils proposent lorsqu'ils résolvent les situations conceptuellement problématiques impliquant la concentration d'une espèce chimique en solution. Par la suite identifier les apprenants qui rencontrent lesdites difficultés parmi les interrogés afin de les assigner au groupe d'intervention et au groupe témoin pour implémenter les différents types de remédiation conçus.

Les résultats obtenus montrent que plus de 65 % des participants éprouvent d'énormes difficultés pour déterminer correctement les concentrations des espèces chimiques dans une solution lorsque la dissolution ne s'effectue plus suivant la proportion 1/1 (c'est-à-dire une mole de substance ionique dissoute dans l'eau libre une mole de chaque type d'ion qu'elle renferme). Ils sont également incapables de faire fonctionner la formule de calcul de la concentration d'une solution ( $C = n/V$ ) lorsqu'il s'agit de la détermination des concentrations des espèces ioniques en solution. Ces difficultés s'accroissent lorsque l'exercice leur est présenté sous la forme littérale (voir questions Q2 et Q3) nécessitant la manipulation d'un nombre élevé des valeurs numériques que lorsqu'une représentation iconographique modélisant les particules ioniques ou moléculaires en solution est associée à la forme littérale de l'énoncé (voir questions Q1 et Q4). Parmi les causes majeures desdites difficultés, figurent :

- la non-maîtrise du calcul de la quantité de matière d'une espèce chimique en solution ;
- la non-maîtrise de l'écriture et l'équilibrage des équations de la dissolution des composés ioniques dans l'eau ;
- la non-prise en compte des coefficients stœchiométriques présents dans les équations de dissolution lors de l'établissement du bilan des quantités de matière lorsqu'ils parviennent à écrire lesdites équations de dissolution ;
- la présence de la conception alternative selon laquelle « *toutes les dissolutions des composés ioniques dans l'eau se font suivant la proportion 1/1 quels que soient les types d'ions qu'ils renferment* » ;
- la confusion conceptuelle entre la quantité de matière et la concentration d'un ion en solution ;

- l'attribution des valeurs numériques incorrectes aux variables de la concentration ionique pour procéder rapidement au calcul numérique lié probablement à une interprétation erronée de l'énoncé ;
- la non-acquisition des concepts tels que la quantité de matière, la dissolution, la proportionnalité d'une grandeur, pour ne citer que ceux-ci, imbriqués autour de la concentration d'une espèce chimique (ions ou molécules) en solution.

Il ressort également des résultats du pré-test que plus de 70 % des participants éprouvent d'énormes difficultés pour déterminer correctement les concentrations des espèces chimiques en solution lorsque le caractère intensif du concept lui-même doit être mobilisé. Parmi les principales causes desdites difficultés, nous avons :

- l'addition ou la division des concentrations chimiques lorsque les solutions sont mélangées ou partagées liée principalement à la présence des conceptions alternatives telles que : « *chaque solution ionique initiale apporte un seul type d'ion au cours de leur mélange* » ; « *la concentration d'une substance ionique dans une solution égale la somme des concentrations des ions qu'elle referme* » ou « *la concentration ionique se divise lors du partage d'une solution en plusieurs volumes* » ;
- l'interprétation erronée des données présentes dans un énoncé ;
- la mobilisation des heuristiques telles que « *des valeurs numériques dans un énoncé impliquent automatiquement des calculs numériques dans la réponse* » qui leur empêche de voir au-delà des chiffres afin de mener un raisonnement conceptuel logique. Dans la plupart de cas, ces heuristiques se transforment en contrat didactique implicite entre l'enseignant et l'élève dont l'enseignant n'a pas toujours conscience ;
- la confusion entre la concentration massique d'une espèce chimique en solution et sa concentration molaire volumique.

Les résultats du pré-test de la présente étude soulignent également qu'environ 50 % des participants ont des difficultés pour déterminer correctement les concentrations des espèces chimiques dans une solution diluée. Parmi les principales causes de ces difficultés, nous avons :

- la non-prise en compte du caractère extensif du volume de la solution après l'ajout du solvant entraînant soit la mobilisation du volume initial de la solution, soit la mobilisation du volume d'eau ajoutée dans les calculs qu'ils effectuent ;

- la confusion, une fois de plus, entre la concentration d'une espèce ionique et sa quantité de matière dans une solution ;
- la non-maîtrise du principe de dilution d'une solution et de son impact sur la concentration chimique.

Les résultats obtenus à la phase du pré-test montrent aussi que les difficultés qu'ont les apprenants à déterminer correctement la concentration d'une espèce chimique en solution sont aussi dues à un manque de connaissances conceptuelles sur le concept lui-même ainsi que les notions qui s'imbriquent autour de lui. Parmi ces notions, nous pouvons dénombrer : la quantité de matière, le volume d'une solution, la masse, la masse molaire, la dilution, l'intensivité, l'extensivité et la proportionnalité d'une grandeur, la dissolution, l'électroneutralité, etc. Ce manque de connaissances conceptuelles pourrait s'expliquer par une faible capacité structurelle mentale de l'apprenant faisant que les contenus conceptuels qu'on lui présente, sont faiblement intégrés ou pas du tout intégrés. Par conséquent, lorsque la résolution d'une tâche cognitive nécessite la mobilisation desdits contenus, l'apprenant ne dispose pas des outils conceptuels nécessaires pour le faire. Ces difficultés sont aussi dues, dans une infime de cas, à une mauvaise coordination, dans les réponses, des notions acquises au cours de la conceptualisation de la concentration chimique. Elles peuvent également provenir d'une combinaison entre les connaissances scientifiques et les conceptions alternatives omniprésentes dans les modèles mentaux des apprenants.

Cependant, puisque l'école reste le principal lieu de transmission des connaissances qu'utilisent les participants pour répondre au questionnaire d'après toujours les résultats que nous avons obtenus au pré-test, les difficultés supra mentionnées sont aussi présumément liées à la manière dont la concentration chimique est parfois transposée par certains acteurs du système éducatif. Par exemple, nous avons les pratiques enseignantes où suite au contact des apprenants avec la grandeur concentration chimique, les enseignants entament avec ces derniers la résolution d'une série d'exercices sur les calculs de la concentration molaire, la concentration massique et les concentrations des espèces chimiques en solution sans que le volume de la solution ne soit précisé. Les seules données disponibles sont la masse ou la quantité de matière du soluté et le volume de solvant, sans pour autant empêcher que ces exercices soient solutionnés. Ce qui sous-entend une assimilation entre le volume de la solution et celui du solvant par les enseignants et certains manuels. Nous avons également les pratiques enseignantes suivant lesquelles les concentrations des espèces chimiques en solution sont directement déduites de la concentration de la solution en établissant une



équivalence entre elles lorsque la dissolution du composé ionique dans l'eau s'est faite suivant la proportion 1/1. C'est par exemple le cas du calcul des concentrations des ions  $\text{Na}^+$  et  $\text{Cl}^-$  dans une solution obtenue en dissolvant le  $\text{NaCl}$  dans l'eau où  $[\text{Na}^+] = [\text{Cl}^-] = C$ , avec  $C$  qui est la concentration de la solution. Ce qui insinue, à son tour, une assimilation entre ces différents modes d'expression de la concentration chimique que les apprenants ont, malencontreusement, tendance à généraliser à tous les autres cas de calcul des concentrations ioniques où cette démarche n'est plus pertinente. Or, les dissolutions dans l'eau des composés ioniques comme le  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  et l' $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$  par exemple ne s'effectuent pas suivant la proportion 1/1. Malheureusement, dans la plupart des cas, ces assimilations se transforment parfois en contrat didactique entre les deux parties sans que l'enseignant ne s'en rende compte.

Ainsi, au travers des résultats supra-mentionnés, nous pouvons confirmer l'hypothèse selon laquelle : les élèves camerounais des classes de séries scientifiques de l'enseignement secondaire général rencontrent les difficultés d'ordres de carence, ontologique, épistémologique et didactique lorsqu'ils répondent aux questions liées à la concentration d'une espèce chimique en solution.

### **3. Résultats du post-test**

#### **3.1. Gain conceptuel par question pour le groupe témoin**

Rappelons ici que le gain conceptuel représente la fréquence ou le pourcentage des réponses incorrectes avant l'activité de remédiation qui deviennent correctes après cette activité. Le tableau 4 donne le récapitulatif des gains conceptuels obtenus à chaque question lorsque les élèves qui ont subi un apprentissage habituel basé sur le conflit cognitif ont répondu au questionnaire du post-test.

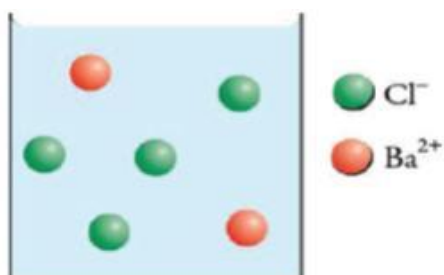
**Tableau 14**

*Récapitulatif des gains conceptuels par question pour le groupe témoin*

<b>Questions</b>	<b>Fréquence des réponses incorrectes avant remédiation</b>	<b>Fréquences des réponses devenues correctes après remédiation</b>	<b>Gain conceptuel par question (%)</b>
<b>Q1</b>	35/51	26/35	74,28
<b>Q2</b>	49/51	17/49	34,69
<b>Q3</b>	47/51	23/47	48,93
<b>Q4</b>	35/51	25/35	71,42
<b>Q5</b>	49/51	24/49	48,97
<b>Q6</b>	47/51	21/47	44,68
<b>Q7</b>	45/51	25/45	53,33

Il ressort du tableau 14 que les questions Q1 et Q4 sont les mieux réussies par les apprenants qui ont bénéficié des activités d'apprentissage basées uniquement sur le conflit cognitif. Par conséquent, elles enregistrent les plus grands gains conceptuels par rapport aux autres questions (Q2, Q3, Q5, Q6 et Q7). Soient un gain conceptuel de 74,28 % pour par la question Q1 et un gain conceptuel de 71,42 % pour la question Q4. Ces questions sont les suivantes :

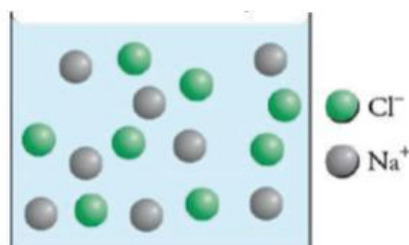
- « Q1 : Le schéma ci-dessous représente une solution aqueuse constituée d'ions chlorures ( $Cl^-$ ) et d'ions baryums ( $Ba^{2+}$ ). Le volume de la solution est  $V = 0,20\text{ L}$ .



<p>1.1) Quelles sont les concentrations (en mol/L) des ions dans cette solution ? Considérez que chaque sphère représente 0,10 mol de l'ion en solution.</p>	<p>a) <math>[Cl^-] = 0,50 \text{ mol/L}</math> et <math>[Ba^{2+}] = 0,50 \text{ mol/L}</math>  b) <math>[Cl^-] = 2 \text{ mol/L}</math> et <math>[Ba^{2+}] = 1 \text{ mol/L}</math>  c) <math>[Cl^-] = 0,4 \text{ mol/L}</math> et <math>[Ba^{2+}] = 0,2 \text{ mol/L}</math>  d) <math>[Cl^-] = 4 \text{ mol/L}</math> et <math>[Ba^{2+}] = 2 \text{ mol/L}</math>  e) Autre réponse à préciser.....</p>
<p>1.2) Justifier votre réponse :</p>	
<p>1.3) Confiance accordée à votre réponse :</p>	<p>a) Sûre  b) Pas sûre »</p>

Rappelons que la réponse juste à la question Q1 est la proposition B ( $[Cl^-] = 2 \text{ mol/L}$  et  $[Ba^{2+}] = 1 \text{ mol/L}$ ) avec une justification pertinente et être sur (ou exceptionnellement pas sûr) de sa réponse.

- « Q4 : Le schéma ci-dessous représente une solution aqueuse de NaCl de volume égal à 0,40 L. On ajoute dans cette solution un volume d'eau égal à 0,10 L.



<p>4.1) Quelle est la concentration (en mol/L) de l'ion sodium (<math>Na^+</math>) dans la solution finale obtenue ? Considérez que chaque sphère</p>	<p>a) <math>[Na^+] = 0,80 \text{ mol/L}</math>  b) <math>[Na^+] = 2 \text{ mol/L}</math>  c) <math>[Na^+] = 1,6 \text{ mol/L}</math>  d) <math>[Na^+] = 16 \text{ mol/L}</math></p>
---	---

<i>représente 0,10 mol de l'ion en solution.</i>	<i>e) Autre réponse à préciser.....</i>
<i>4.2) Justifier votre réponse :</i>	
<i>4.3) Confiance accordée à votre réponse :</i>	<i>a) Sûre b) Pas sûre »</i>

Rappelons également que la réponse juste de la question Q4 est la proposition C ( $[\text{Na}^+] = 1 \text{ mol/L}$ ) avec une justification pertinente et être sûr (ou exceptionnellement pas sûr) de sa réponse.

Ces résultats se justifient d'une part, par le fait que les questions Q1 et Q4 sont des questions d'application directe du cours et d'observation qui ne nécessitent pas une démarche particulière ou un effort intellectuel supplémentaire de la part de l'élève pour être résolues. D'autre part, ils se justifient aussi par le fait que les questions Q1 et Q4 sont les questions sur lesquelles les apprenants éligibles au test avaient moins des conceptions alternatives lors de la phase du pré-test de la présente étude (soient 27,16 % et 24,78 % des interrogés qui manifestaient des conceptions alternatives sur les questions Q1 et Q4 respectivement). Par contre, ils manifestaient plutôt une carence conceptuelle élevée sur les deux questions (environ 67 % pour chacune des questions Q1 et Q4) comparativement à d'autres questions du pré-test.

Les résultats des questions Q1 et Q4 permettent ainsi de déduire que le conflit cognitif seul permet déjà aux apprenants qui éprouvent préalablement les difficultés à déterminer les concentrations des espèces chimiques en solution de mieux déterminer lesdites concentrations lorsque la dissolution d'un composé ionique dans l'eau ne s'est pas faite suivant la proportion 1/1 (question Q1) ou lorsque la solution est diluée (question Q4). Mais cela n'est valable que lorsque l'énoncé de l'exercice à résoudre est accompagné de la représentation iconographique qui modélise les espèces chimiques dans la solution dont on veut déterminer leurs concentrations. Ces résultats confirment ainsi les résultats de Taber (2001) et Cormier (2014) selon lesquels les difficultés d'apprentissage en chimie qui ne sont pas liées aux conceptions alternatives peuvent être corrigées très facilement par des interventions didactiques simples et moins lourdes.

En revanche, la question qui enregistre le plus petit gain conceptuel est la question Q2 (34,69 %). Elle est la moins réussie par les apprenants qui ont bénéficié un apprentissage habituel basé sur le conflit cognitif. Cette question est :

« Q2 : On mélange 0,35 L d'une solution de NaCl de concentration égale à 1,66 mol/L avec 0,15 L d'une solution de NaCl de concentration égale à 0,89 mol/L.

2.1) Quelles sont les concentrations (en mol/L) des ions dans la solution finale obtenue ?	a) $[Cl^-] = 1,42 \text{ mol/L}$ et $[Na^+] = 1,42 \text{ mol/L}$ b) $[Cl^-] = 2,55 \text{ mol/L}$ et $[Na^+] = 2,55 \text{ mol/L}$ c) $[Cl^-] = 0,71 \text{ mol/L}$ et $[Na^+] = 0,71 \text{ mol/L}$ d) $[Cl^-] = 0,58 \text{ mol/L}$ et $[Na^+] = 0,13 \text{ mol/L}$ e) Autre réponse à préciser.....
2.2) Justifier votre réponse :	
2.3) Confiance accordée à votre réponse :	a) Sûre b) Pas sûre »

La réponse correcte à la question Q2 est la proposition (a) à savoir  $[Cl^-] = 1,42 \text{ mol/L}$  et  $[Na^+] = 1,42 \text{ mol/L}$  avec une justification pertinente et être sûr (ou exceptionnellement pas sûr) de sa réponse.

Le résultat obtenu à la question Q2 se justifie par le fait que près de 97 % des apprenants qui ont bénéficié d'un apprentissage habituel basé principalement sur le conflit cognitif avaient des conceptions alternatives sur l'intensivité de la grandeur concentration chimique. Parmi les conceptions alternatives sur l'intensivité de la concentration chimique identifiées au pré-test, celle qui persiste principalement chez ces apprenants même après l'intervention est : « *Le mélange de deux ou de plusieurs volumes de solutions implique l'addition des concentrations chimiques* ». Ainsi, plusieurs apprenants du groupe témoin ne résistent pas à l'emploi de ladite conception lorsqu'ils doivent déterminer la concentration d'une espèce ionique dans un mélange des solutions. Ils continuent à recourir aux stratégies basées sur cette conception pour déterminer de façon incorrecte les concentrations demandées à la question Q2. Nous notons également l'incapacité des apprenants à manipuler un grand nombre des valeurs numériques dans un exercice afin de déterminer correctement les concentrations ioniques demandées qui pourraient également justifier ce résultat.

Toutefois, le recours continu aux stratégies de raisonnement basées sur la conception alternative selon laquelle : « *La concentration ionique se divise ou s'additionne lors du*

partage d'une solution en plusieurs volumes ou lors de l'addition de plusieurs volumes de solution », même après l'intervention de remédiation, pourrait également expliquer les gains conceptuels insuffisants ou moyens obtenus aux questions : Q5 (48,97 %) ; Q6 (44,68 %) et Q7 (53,33 %). Ces questions sont :

- « Q5 : On mélange deux volumes égaux d'une même solution de chlorure de sodium NaCl de concentration égale à 0,10 mol/L.

5.1) Quelle est la concentration (en mol/L) de l'ion chlorure ( $\text{Cl}^-$ ) dans la solution finale obtenue ?	a) $[\text{Cl}^-] = 0,20 \text{ mol/L}$ b) $[\text{Cl}^-] = 0,05 \text{ mol/L}$ c) $[\text{Cl}^-] = 0,10 \text{ g/mol}$ d) $[\text{Cl}^-] = 0,10 \text{ mol/L}$ e) Autre réponse à préciser.....
5.2) Justifier votre réponse :	
5.3) Confiance accordée à votre réponse	a) Sûre b) Pas sûre »

La réponse juste est la proposition d ( $[\text{Cl}^-] = 0,10 \text{ mol/L}$ ) avec une justification pertinente et être sûr (ou exceptionnellement pas sûr) de sa réponse ;

- « Q6 : soient 5 solutions aqueuses identiques (même soluté et même solvant) de concentration en ion calcium ( $\text{Ca}^{2+}$ ) égale à 0,20 mol/L. On rassemble dans un même récipient les 5 solutions.

6.1) Quelle est la concentration (en mol/L) de l'ion $\text{Ca}^{2+}$ dans la solution finale obtenue ?	a) $[\text{Ca}^{2+}] = 0,20 \text{ mol/L}$ b) $[\text{Ca}^{2+}] = 0,04 \text{ mol/L}$ c) $[\text{Ca}^{2+}] = 5 \text{ mol/L}$ d) $[\text{Ca}^{2+}] = 1 \text{ mol/L}$ e) Autre réponse à préciser.....
6.2) Justifier votre réponse :	
6.3) Confiance accordée à votre réponse :	a) Sûre b) Pas sûre »

La réponse juste est la proposition la proposition a ( $[\text{Ca}^{2+}] = 0,20 \text{ mol/L}$ ) avec une justification pertinente et être sûr (ou exceptionnellement pas sûr) de sa réponse ;

- « Q7 : Une bouteille (1,5 L) de jus Chapman contient 131 g/L de glucose ( $\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6$ ). On divise ce jus dans 3 verres de 0,5 L chacun.

<p>7.1) Quelle est la concentration (en g/L) du glucose dans chaque verre de jus ?</p> <p><math>M_{C_6H_{12}O_6} = 180 \text{ g/mol}</math></p>	<p>a) <math>[C_6H_{12}O_6] = 43,67 \text{ g/L}</math></p> <p>b) <math>[C_6H_{12}O_6] = 262 \text{ g/L}</math></p> <p>c) <math>[C_6H_{12}O_6] = 83,33 \text{ g/L}</math></p> <p>d) <math>[C_6H_{12}O_6] = 131 \text{ g/L}</math></p> <p>e) Autre réponse à préciser.....</p>
<p>7.2) Justifier votre réponse :</p>	
<p>7.3) Confiance accordée à votre réponse :</p>	<p>a) Sûre</p> <p>b) Pas sûre »</p>

La réponse juste est la proposition d ( $[C_6H_{12}O_6] = 131 \text{ g/L}$ ) avec une justification pertinente et être sûr (ou exceptionnellement pas sûr) de sa réponse.

Ces questions (Q5, Q6 et Q7) sont celles sur lesquelles plus de 90 % des apprenants éligibles au test avaient également les conceptions alternatives. L'analyse des productions des apprenants montre également que la plupart des apprenants qui répondent de façon erronée aux questions Q5, Q6 et Q7 du post-test, continue à mobiliser des stratégies basées sur les calculs numériques (règle de trois, la division ou l'addition des concentrations, etc.). Or, la maîtrise du caractère intensif de la concentration chimique aurait suffi pour fournir une réponse exacte à chacun de ces questions sans préalablement effectuer lesdits calculs. Car comme nous l'avons montré au niveau de notre cadre conceptuel, l'addition de plusieurs solutions filles de mêmes caractéristiques ou la division d'une solution mère en plusieurs solutions filles n'impacte pas sur la concentration chimique. Mais malgré la remédiation qu'ils ont bénéficié, ils recourent toujours à l'heuristique selon laquelle : « *Des valeurs numériques dans un énoncé impliquent automatiquement des calculs numériques dans la réponse* ». Laquelle heuristique leur empêche de voir au-delà des chiffres afin de mener un raisonnement conceptuel logique comme nous l'avons montré au niveau du pré-test.

Quant à la question Q3, elle enregistre, tout comme les questions Q5, Q6 et Q7, un gain conceptuel, relativement insuffisant (48,93 %). Cette question fait également partie des questions sur lesquelles les apprenants éligibles au test avaient un taux des conceptions alternatives de plus de 90 % au pré-test. Elle est formulée en ces termes : « *Q3 : On dissout dans l'eau 5 g de sulfate de potassium ( $K_2SO_4$ ) et on obtient une solution de volume égal à 0,1 L.*

3.1) Quelle est la concentration (en mol/L) de l'ion potassium ( $K^+$ ) dans cette solution sachant que $M_{K_2SO_4} = 174 \text{ g/mol}$ ?	a) $[K^+] = 0,28 \text{ mol/L}$ b) $[K^+] = 0,028 \text{ mol/L}$ c) $[K^+] = 0,57 \text{ mol/L}$ d) $[K^+] = 50 \text{ mol/L}$ e) Autre réponse à préciser...
3.2) Justifier votre réponse :	
3.3) Confiance accordée à votre réponse :	a) Sûre b) Pas sûre »

La réponse correcte est la proposition c ( $[K^+] = 0,57 \text{ mol/L}$ ) avec une justification pertinente et être sûr (ou exceptionnellement pas sûr) de sa réponse.

L'analyse des productions des apprenants du groupe témoin (ayant exclusivement subi l'apprentissage basé sur le conflit cognitif) montrent que plus de 90 % des apprenants de ce groupe qui ont répondu de façon erronée à la question Q3 au post-test, continue de ne pas prendre en compte dans leurs calculs le coefficient stœchiométrique deux (2) qui est placé devant l'ion potassium comme l'indique l'équation de dissolution de  $K_2SO_4$  dans l'eau suivante :  $K_2SO_{4(s)} \longrightarrow 2K^+_{(aq)} + SO_4^{2-}_{(aq)}$ . Ces apprenants continuent à penser que la dissolution d'une mole de solide ionique dans l'eau forme une mole de cation et une mole d'anion quelle que soit la nature ou la composition du solide ionique. D'où la démarche suivante :  $[K^+] = n/V = m/M \times V = 5/0,1 \times 174 = 0,28 \text{ mol/L}$  qu'ils continuent à adopter pour déterminer la concentration demandée, malgré l'intervention de remédiation qu'ils ont subie. Par conséquent, tout comme au pré-test de la présente étude, nous constatons que ces apprenants ne parviennent pas toujours à établir la différence entre la concentration d'une solution et la concentration d'une espèce chimique en solution.

Contrairement aux résultats des questions Q1 et Q4, les résultats des questions Q2, Q3, Q5, Q6 et Q7 montrent qu'un apprentissage basé principalement sur le conflit cognitif améliore passablement les scores des apprenants qui éprouvent préalablement les difficultés à déterminer les concentrations des espèces chimiques en solution liées à l'existence des conceptions alternatives. Ces résultats confirment de nouveau les résultats de Taber (2001), Cormier (2014) et Willame (2017) selon lesquels les difficultés d'apprentissage en chimie liées aux conceptions alternatives sont difficiles à corriger par des interventions didactiques



moins lourdes basées par exemple sur le conflit cognitif seul, contrairement aux difficultés qui sont liées aux carences et aux mauvais agencements conceptuels.

### 3.2. Gain conceptuel par question pour le groupe expérimental

Le tableau 15 donne le récapitulatif des gains conceptuels obtenus à chaque question lorsque les élèves qui ont subi un apprentissage basé sur la prévalence conceptuelle ont répondu au questionnaire du post-test.

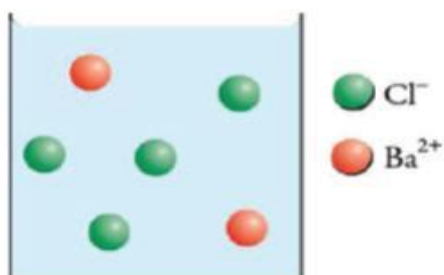
**Tableau 15**

*Récapitulatif des gains conceptuels par question pour le groupe expérimental*

Questions	Fréquence des réponses incorrectes avant remédiation	Fréquences des réponses devenues correctes après remédiation	Gain conceptuel par question (%)
Q1	33/51	30/33	90,90
Q2	50/51	33/50	66,00
Q3	48/51	37/48	77,08
Q4	31/51	26/31	83,87
Q5	48/51	38/48	79,16
Q6	47/51	37/47	78,72
Q7	48/51	37/48	77,08

Il ressort de ce tableau que toutes les questions du post-test enregistrent un gain conceptuel supérieur à 60 %. Les questions Q1 et Q4 enregistrent les plus grands gains conceptuels par rapport aux autres questions (Q2, Q3, Q5, Q6 et Q7). Soient respectivement un gain conceptuel de 90,90 % pour la question Q1 et un gain conceptuel de 83,87 % pour par la question Q4. Ces questions sont :

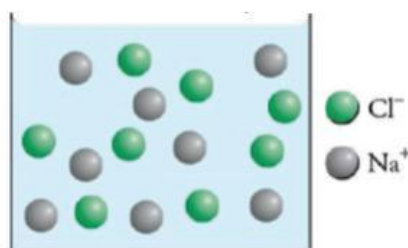
- « Q1: Le schéma ci-dessous représente une solution aqueuse constituée d'ions chlorures ( $Cl^-$ ) et d'ions baryums ( $Ba^{2+}$ ). Le volume de la solution est  $V = 0,20\text{ L}$ .



<p>1.1) Quelles sont les concentrations (en mol/L) des ions dans cette solution ? Considérez que chaque sphère représente 0,10 mol de l'ion en solution.</p>	<p>a) <math>[Cl^-] = 0,50 \text{ mol/L}</math> et <math>[Ba^{2+}] = 0,50 \text{ mol/L}</math>  b) <math>[Cl^-] = 2 \text{ mol/L}</math> et <math>[Ba^{2+}] = 1 \text{ mol/L}</math>  c) <math>[Cl^-] = 0,4 \text{ mol/L}</math> et <math>[Ba^{2+}] = 0,2 \text{ mol/L}</math>  d) <math>[Cl^-] = 4 \text{ mol/L}</math> et <math>[Ba^{2+}] = 2 \text{ mol/L}</math>  e) Autre réponse à préciser.....</p>
<p>1.2) Justifier votre réponse :</p>	
<p>1.3) Confiance accordée à votre réponse :</p>	<p>a) Sûre  b) Pas sûre »</p>

La réponse juste est la proposition B ( $[Cl^-] = 2 \text{ mol/L}$  et  $[Ba^{2+}] = 1 \text{ mol/L}$ ) avec une justification pertinente et être sur (ou exceptionnellement pas sûr) de sa réponse ;

- « Q4 : Le schéma ci-dessous représente une solution aqueuse de NaCl de volume égal à 0,40 L. On ajoute dans cette solution un volume d'eau égal à 0,10 L.



<p>4.1) Quelle est la concentration (en mol/L) de l'ion sodium (<math>Na^+</math>) dans la solution finale obtenue ? Considérez que chaque sphère</p>	<p>a) <math>[Na^+] = 0,80 \text{ mol/L}</math>  b) <math>[Na^+] = 2 \text{ mol/L}</math>  c) <math>[Na^+] = 1,6 \text{ mol/L}</math>  d) <math>[Na^+] = 16 \text{ mol/L}</math>  e) Autre réponse à préciser.....</p>
---	---

<i>représente 0,10 mol de l'ion en solution.</i>	
<i>4.2) Justifier votre réponse :</i>	
<i>4.3) Confiance accordée à votre réponse :</i>	<i>a) Sûre b) Pas sûre »</i>

La réponse juste est la proposition C ( $[\text{Na}^+] = 1 \text{ mol/L}$ ) avec une justification pertinente et être sûr (ou exceptionnellement pas sûr) de sa réponse.

Les questions Q3, Q5, Q6 et Q7 enregistrent également les gains conceptuels envoisinant les 80 %. Soient plus précisément : 77,03 % pour la question Q3 ; 79,16 % pour la question Q5 ; 78,72 % pour la question Q6 et 77,08 % pour la question Q7. Ces questions sont :

- « Q3 : On dissout dans l'eau 5 g de sulfate de potassium ( $\text{K}_2\text{SO}_4$ ) et on obtient une solution de volume égal à 0,1 L.

<i>3.1) Quelle est la concentration (en mol/L) de l'ion potassium (<math>\text{K}^+</math>) dans cette solution sachant que <math>M_{\text{K}_2\text{SO}_4} = 174 \text{ g/mol}</math> ?</i>	<i>a) <math>[\text{K}^+] = 0,28 \text{ mol/L}</math> b) <math>[\text{K}^+] = 0,028 \text{ mol/L}</math> c) <math>[\text{K}^+] = 0,57 \text{ mol/L}</math> d) <math>[\text{K}^+] = 50 \text{ mol/L}</math> e) Autre réponse à préciser...</i>
<i>3.2) Justifier votre réponse :</i>	
<i>3.3) Confiance accordée à votre réponse :</i>	<i>a) Sûre b) Pas sûre »</i>

La réponse correcte la proposition c ( $[\text{K}^+] = 0,57 \text{ mol/L}$ ) avec une justification pertinente et être sûr (ou exceptionnellement pas sûr) de sa réponse ;

- « Q5 : On mélange deux volumes égaux d'une même solution de chlorure de sodium  $\text{NaCl}$  de concentration égale à 0,10 mol/L.

<i>5.1) Quelle est la concentration (en mol/L) de l'ion chlorure (<math>\text{Cl}^-</math>) dans la solution finale obtenue ?</i>	<i>a) <math>[\text{Cl}^-] = 0,20 \text{ mol/L}</math> b) <math>[\text{Cl}^-] = 0,05 \text{ mol/L}</math> c) <math>[\text{Cl}^-] = 0,10 \text{ g/mol}</math> d) <math>[\text{Cl}^-] = 0,10 \text{ mol/L}</math></i>
---	--

	e) Autre réponse à préciser.....
5.2) Justifier votre réponse :	
5.3) Confiance accordée à votre réponse	a) Sûre b) Pas sûre »

La réponse juste est la proposition d ( $[Cl^-] = 0,10 \text{ mol/L}$ ) avec une justification pertinente et être sûr (ou exceptionnellement pas sûr) de sa réponse ;

- « Q6 : soient 5 solutions aqueuses identiques (même soluté et même solvant) de concentration en ion calcium ( $Ca^{2+}$ ) égale à  $0,20 \text{ mol/L}$ . On rassemble dans un même récipient les 5 solutions.

6.1) Quelle est la concentration (en mol/L) de l'ion $Ca^{2+}$ dans la solution finale obtenue ?	a) $[Ca^{2+}] = 0,20 \text{ mol/L}$ b) $[Ca^{2+}] = 0,04 \text{ mol/L}$ c) $[Ca^{2+}] = 5 \text{ mol/L}$ d) $[Ca^{2+}] = 1 \text{ mol/L}$ e) Autre réponse à préciser.....
6.2) Justifier votre réponse :	
6.3) Confiance accordée à votre réponse :	a) Sûre b) Pas sûre »

La réponse juste est la proposition la proposition a ( $[Ca^{2+}] = 0,20 \text{ mol/L}$ ) avec une justification pertinente et être sûr (ou exceptionnellement pas sûr) de sa réponse ;

- « Q7 : Une bouteille (1,5 L) de jus Chapman contient 131 g/L de glucose ( $C_6H_{12}O_6$ ). On divise ce jus dans 3 verres de 0,5 L chacun.

7.1) Quelle est la concentration (en g/L) du glucose dans chaque verre de jus ? $M_{C_6H_{12}O_6} = 180 \text{ g/mol}$	a) $[C_6H_{12}O_6] = 43,67 \text{ g/L}$ b) $[C_6H_{12}O_6] = 262 \text{ g/L}$ c) $[C_6H_{12}O_6] = 83,33 \text{ g/L}$ d) $[C_6H_{12}O_6] = 131 \text{ g/L}$ e) Autre réponse à préciser.....
7.2) Justifier votre réponse :	
7.3) Confiance accordée à votre réponse :	a) Sûre b) Pas sûre »

La réponse juste est la proposition d ( $[C_6H_{12}O_6] = 131 \text{ g/L}$ ) avec une justification pertinente et être sûr (ou exceptionnellement pas sûr) de sa réponse.

Les questions Q3, Q5, Q6 et Q7 ainsi que les questions Q1 et Q4 sont mieux réussies par les apprenants qui ont bénéficié des activités d'apprentissage basées sur les conceptions prévalentes. Ces résultats ainsi que l'analyse des productions des apprenants du groupe expérimental montrent que plus de trois-quarts (plus 75 %) des apprenants qui répondaient de façon erronée aux questions Q1, Q3, Q4, Q5, Q6 et Q7 au prétest, répondent correctement à ces questions lorsqu'ils ont bénéficié d'un apprentissage basé sur les conceptions prévalentes. Ainsi, l'approche métacognitive qui consiste à créer les alertes pour mettre en garde de l'existence d'un piège lors de l'exécution d'une tâche cognitive a permis aux apprenants de mieux contrôler leurs habitudes spontanées. En d'autres termes, cette approche a permis aux apprenants de reconnaître les circonstances dans lesquelles ils devraient résister ou renoncer à utiliser leurs idées préconçues (conceptions alternatives) et leurs mécanismes routiniers des résolutions des problèmes développés durant l'apprentissage au profit plutôt de l'emploi des connaissances scientifiques apprises et adaptées à la circonstance. Parmi les heuristiques ou mécanismes routiniers des résolutions des problèmes ainsi que les conceptions alternatives identifiées au pré-test que les élèves du groupe expérimental ont présumément inhibés pour répondre correctement aux questions du post-test supra-mentionnées, nous avons principalement :

- « *des valeurs numériques dans un énoncé impliquent automatiquement des calculs numériques dans la réponse* » et « *la concentration ionique se divise ou s'additionne lors du partage d'une solution en plusieurs volumes ou lors de l'addition de plusieurs volumes de solution* » qui empêchaient ces derniers, avant l'intervention, de voir au-delà des chiffres afin de mener un raisonnement conceptuel logique pour répondre correctement aux questions Q5, Q6 et Q7 nécessitant principalement la mobilisation du caractère intensif de la grandeur concentration chimique. Puisque l'addition de plusieurs volumes de solution de mêmes caractéristiques ou la division d'une solution en plusieurs volumes n'impacte pas sur la concentration chimique ;
- « *toutes les dissolutions des composés ioniques dans l'eau se font suivant la proportion 1/1 quels que soient les types d'ions qu'ils renferment* » qui empêchait ces derniers de calculer correctement, avant l'intervention, les concentrations des ions en solutions demandées aux questions Q1 et Q3 où la dissolution du composé ionique dans l'eau ne s'effectue plus suivant la proportion 1/1, afin d'activer la

stratégie pertinente. Cette stratégie est basée principalement sur la prise en compte des coefficients stœchiométriques placés devant les ions dans les équations-bilans de dissolutions lors des calculs des concentrations ioniques ;

- l'inhibition du « *volume initial de la solution* » et du « *volume d'eau ajoutée pour diluer la solution initiale* » qu'ils mobilisaient pour répondre de façon erronée à la question Q4 avant l'intervention au profit de l'activation de la stratégie pertinente basée sur la mobilisation du « *volume final de la solution obtenue après l'ajout de l'eau* » pour désormais répondre correctement à ladite question.

Cependant, les résultats du post-test montrent que l'inhibition des stratégies basées sur les heuristiques et sur les conceptions alternatives supra-mentionnées ainsi que l'activation des différentes stratégies pertinentes suivant le contexte de chaque question n'ont pas permis au interrogés du groupe expérimental de mieux répondre à la question Q2 comparativement aux autres questions. Car la question Q2 enregistre un gain conceptuel de 66 % au post-test tandis que toutes les autres questions enregistrent chacune un gain conceptuel d'au moins 77 %.

Le gain conceptuel de la question Q2 relativement bas par rapport aux gains conceptuels des autres questions peut se justifier par le fait que malgré l'intervention, certains apprenants du groupe expérimental continuent de recourir à la stratégie basée sur la conception alternative selon laquelle « *le mélange de deux ou de plusieurs volumes de solution implique l'addition des concentrations chimiques* » qu'ils sont sensés plutôt inhiber afin de répondre correctement à cette question. De plus, la présence d'un grand nombre des valeurs numériques dans l'énoncé de la question Q2 à manipuler lors de la détermination des concentrations ioniques demandées pourrait également justifier ce résultat.

Globalement, les résultats du post-test des interrogés du groupe expérimental montrent que l'approche métacognitive qui consiste à entraîner les apprenants à reconnaître les contextes où ils doivent bloquer certaines réponses intuitives erronées pour faire prévaloir la conception scientifique pertinente est bénéfique pour les apprenants qui éprouvent des difficultés à déterminer les concentrations des espèces chimiques en solution. Car en créant les alertes permettant de mettre en garde de l'existence d'un piège afin d'inhiber les stratégies basées sur les heuristiques et sur les conceptions alternatives qui aboutissent aux réponses fausses et activer la stratégie pertinente suivant le contexte de la question ou de l'apprentissage, les apprenants répondent de plus en plus correctement aux questions du post-test qu'ils échouaient auparavant. Ces derniers ont ainsi amélioré leurs scores lorsqu'ils

sont de nouveaux interrogés sur des questions liées aux calculs des concentrations des espèces chimiques en solution. Ces résultats viennent confirmer en situation de classe les résultats de Potvin (2013) ; Dawson (2014) ; Potvin et al. (2015) et Potvin (2018) qui postulent que plusieurs conceptions contradictoires peuvent possiblement coexister et qu'en rendant la conception scientifique disponible, suivie d'une inhibition des conceptions non-pertinentes dans le contexte de la question, cela permettrait de répondre plus souvent à la question de manière correcte.

### 3.3. Confrontation des résultats du groupe expérimental et du groupe témoin

Le tableau 16 et le graphe de la figure 53 confrontent les gains conceptuels obtenus par question en fonction du type de remédiation subie dans le groupe témoin et dans le groupe expérimental.

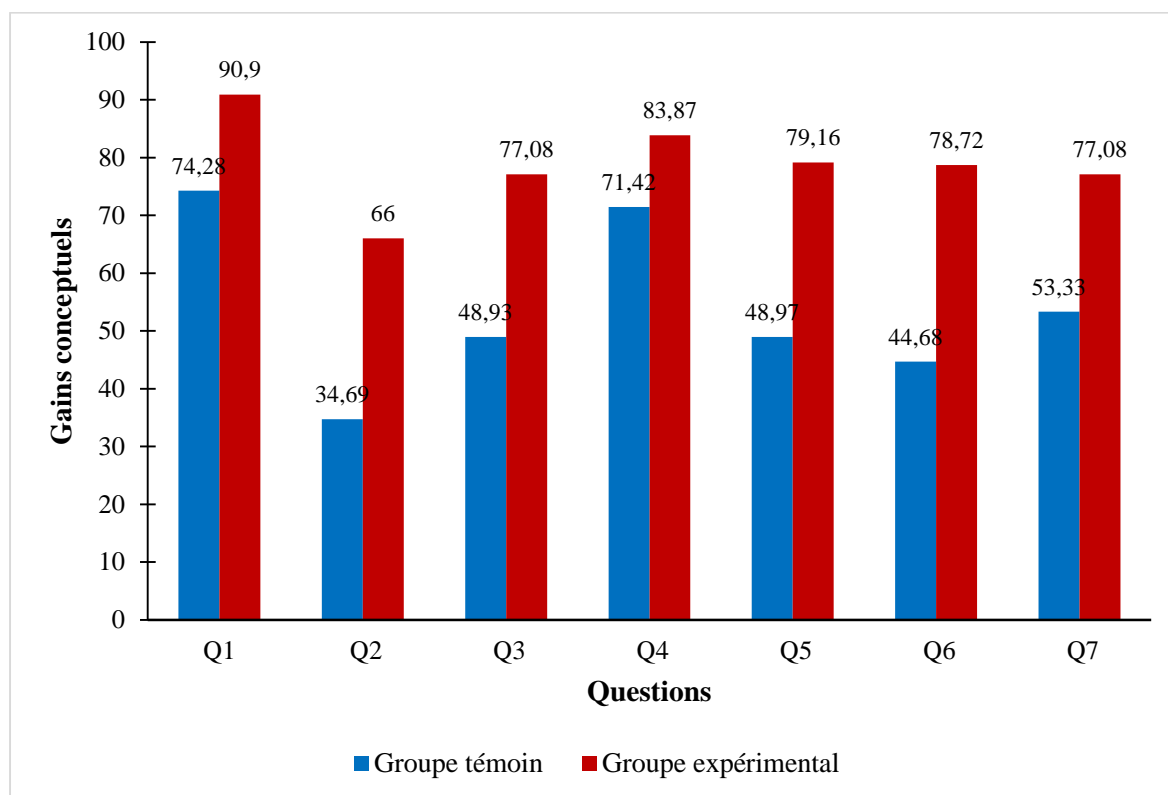
**Tableau 16**

*Gains conceptuels par question en fonction du type de remédiation*

<b>Questions</b>	<b>Gain conceptuel par question pour le groupe témoin (%)</b>	<b>Gain conceptuel par question pour le groupe expérimental (%)</b>
<b>Q1</b>	74,28	90,90
<b>Q2</b>	34,69	66,00
<b>Q3</b>	48,93	77,08
<b>Q4</b>	71,42	83,87
<b>Q5</b>	48,97	79,16
<b>Q6</b>	44,68	78,72
<b>Q7</b>	53,33	77,08

**Figure 53**

*Grappe confrontant les gains conceptuels par question en fonction du type de remédiation.*



Lorsque nous confrontons les résultats du post-test du groupe témoin et du groupe expérimental, il ressort que les questions Q1 et Q4 enregistrent les plus grands gains conceptuels peu importe le type de remédiation utilisée. Elles sont les questions les mieux réussies par l'ensemble des élèves testés. Soient une moyenne de gain conceptuel de 82,59 % pour la question Q1 et une moyenne de gain conceptuel de 77,65 % pour la question Q4 pour les deux types de remédiations utilisés dans le cadre de la présente recherche. Comme nous avons mentionné précédemment, rappelons que ces résultats peuvent se justifier par le fait que les questions Q1 et Q4 sont des questions d'application directe du cours et d'observation qui ne nécessitent pas une démarche particulière ou un effort intellectuel supplémentaire de la part de l'élève pour être résolues. Ces résultats peuvent également se justifier par le fait que les questions Q1 et Q4 sont celles sur lesquelles les apprenants éligibles au test avaient moins des conceptions alternatives au pré-test, mais ils manifestaient plutôt des carences conceptuelles élevées sur les deux questions par rapport aux autres questions. Or, la remédiation des difficultés liées aux carences conceptuelles en chimie



nécessite des interventions didactiques moins lourdes comparativement à la remédiation des difficultés qui sont plutôt liées aux conceptions alternatives (Taber, 2001 & Cormier, 2014).

Il ressort aussi de la confrontation des résultats du post-test du groupe témoin et du groupe expérimental que la question Q2 enregistre le gain conceptuel le plus bas quel que soit le type de remédiation utilisé. Soit une moyenne de gain conceptuel de 50,35 % pour les deux types de remédiations utilisés dans le cadre de la présente recherche. Elle est la question la moins réussie par l'ensemble des élèves testés. Comme nous avons supra-mentionné, ce faible gain conceptuel obtenu à la question Q2 peut se justifier par le fait que malgré les différentes interventions de remédiation, certains apprenants continuent de recourir par exemple aux stratégies basées sur la conception alternative selon laquelle « *le mélange de deux ou de plusieurs volumes de solution implique l'addition des concentrations chimiques* » qu'ils sont sensés plutôt inhiber afin de répondre correctement à cette question. Ce résultat peut également se justifier par l'incapacité des interrogés à manipuler le nombre important des données numériques présentes dans l'énoncé de la question Q2 lors de la déterminer des concentrations ioniques demandées. Car selon Bunce (2005), la présence d'un grand nombre des données que les apprenants doivent manipuler lors de la résolution d'un problème chimique est souvent déconcertante pour ces derniers. Et quel que soit le type d'intervention que les apprenants auront bénéficié, plusieurs parmi eux continueront à procéder par analogie pour résoudre des tels problèmes, parfois sans même les comprendre. C'est-à-dire qu'ils vont faire correspondre le nouveau problème à résoudre aux problèmes résolus et stockés dans leur mémoire à long terme. Or, trop souvent, ces connaissances chimiques dans leur mémoire à long terme sont superficielles et parfois très mal organisées ou codifiées (Bunce, 2005). Par conséquent, elles ne sont pas facilement accessibles ou disponibles lorsque l'apprenant les sollicite ; justifiant ainsi le recours permanent des apprenants aux raisonnements routiniers basés sur les heuristiques ou sur les conceptions alternatives qui conduisent aux réponses fausses dans la plupart des cas.

Enfin, le tableau 17 donne les moyennes des gains conceptuels pour le groupe témoin et le groupe expérimental.

**Tableau 17***Moyennes des gains conceptuels pour chaque groupe d'intervention*

<b>Groupes</b>	<b>Moyenne des gains conceptuels</b>	<b>Ecart-type</b>
<b>Groupe témoin</b>	53,75 %	14,29
<b>Groupe expérimental</b>	78,97 %	7,55

Lorsque nous comparons les moyennes des gains conceptuels de deux groupes, nous constatons que la moyenne des gains conceptuels du groupe expérimental (78,97 %) est largement supérieure à la moyenne des gains conceptuels du groupe témoin (53,75 %). Soit une nette différence de 25,22 % entre les deux moyennes. De plus, lorsque nous examinons les écart-types de deux groupes, nous constatons que les données sont plus dispersées dans le groupe témoin que dans le groupe expérimental. Les résultats du test Z ( $Z = 5,04 > 1,96$  avec  $p = 0,0000001$  qui est très significative comparée au seuil de 0,05) confirment également l'écart considérable entre les résultats du groupe expérimental (remédiation basée sur la prévalence conceptuelle) et les résultats du groupe témoin (remédiation basée uniquement sur le conflit cognitif). Ces différents résultats nous permettent de conclure que les activités de remédiation impliquant le modèle de prévalence conceptuelle améliorent de manière plus significative les scores des apprenants ayant des difficultés pour déterminer la concentration d'une espèce chimique en solution par rapport aux activités de remédiation traditionnelle basée sur les conflits cognitifs. Nous validons ainsi notre deuxième hypothèse secondaire de recherche.

La validation de la deuxième hypothèse secondaire de cette recherche ainsi que la validation de la première hypothèse secondaire au travers des résultats du pré-test nous permettent de valider l'hypothèse générale de cette recherche à savoir : un apprentissage basé sur le modèle de prévalence conceptuelle permet de mieux surmonter les difficultés rencontrées lors de la détermination de la concentration d'une espèce chimique en solution par les apprenants camerounais des séries scientifiques de l'enseignement secondaire général.

Lorsque nous examinons attentivement nos résultats obtenus après les deux types de remédiation, on se rend compte que plus de la moitié des réponses proposées par les

apprenants aux différentes questions sont justes après les remédiations. Ces résultats suggèrent une bonne compréhension du concept de concentration d'une espèce chimique en solution par l'ensemble des élèves testés. Ces résultats correspondent bien avec ceux obtenus par Willame (2017) ; Willame et Snauwaert (2018) où ces derniers montrent l'impact positif du conflit cognitif suivi d'un entraînement au contrôle inhibiteur pour l'acquisition de la concentration chimique d'une solution aqueuse par des élèves du secondaire Belge. Ces résultats correspondent également bien avec ceux obtenus par Ayina Bouni et al. (2021) dans une étude préliminaire qui a balisé la présente thèse où ces derniers montrent, à leur tour, qu'un apprentissage visant un changement de prévalence conceptuelle permet une meilleure conceptualisation de la concentration molaire d'une solution par les élèves du secondaire camerounais de niveau troisième.

Néanmoins, malgré cette compréhension globale du concept de concentration chimique et plus particulièrement celui de la concentration d'une espèce chimique en solution et l'efficacité de la méthode basée sur la prévalence conceptuelle, certains élèves ne proposent pas toujours les réponses exactes aux questions posées. Donc, l'entraînement des apprenants à reconnaître les contextes où ils doivent bloquer certaines idées intuitives erronées pour faire prévaloir les conceptions scientifiques dans le contexte où elles sont pertinentes n'a pas permis à l'ensemble des élèves testés de surmonter les difficultés rencontrées lors du calcul de la concentration d'une espèce chimique que nous avons identifié à la phase du pré-test. Ceci pourrait s'expliquer par le fait que malgré l'accent mis sur la description au préalable du concept de la concentration chimique et de la concentration d'une espèce chimique en solution suivie de la mise en évidence des pièges à éviter, certains élèves continuent à puiser dans leurs cadres routiniers lorsqu'ils font face à une situation conceptuellement problématique. Comme nous l'avons déjà signalé dans notre cadre théorique, ces habitudes appelées : *p-prims*, heuristiques, règle intuitive, catégorie ontologique, conception alternative, etc. » par Chi (2008) ; diSessa (2017) ; Potvin (2018) et Potvin et al. (2020) amèneraient certains apprenants à formuler leurs réponses à partir d'habitudes interprétatives intuitives et élémentaires plutôt qu'aux dépens des théories scientifiques bien élaborées.

Ces dysfonctionnements pourraient aussi être renforcés par le choix de la transposition didactique opérée par certains acteurs directs du système éducatif. Nous avons par exemple la pratique suivant laquelle la concentration d'une espèce chimique en solution est directement déduite de la concentration de la solution en établissant une équivalence entre

lesdites concentrations. Par exemple, nous avons le calcul des concentrations des ions  $\text{Na}^+$  et  $\text{Cl}^-$  dans une solution obtenue en dissolvant le  $\text{NaCl}$  dans l'eau où  $[\text{Na}^+] = [\text{Cl}^-] = C$ , avec  $C$  qui est la concentration de la solution. Cela insinue une assimilation entre ces différents modes d'expression de la concentration chimique que les apprenants ont malencontreusement tendance à généraliser à tous les autres cas de calcul des concentrations ioniques où cette démarche n'est plus pertinente. Or, les dissolutions dans l'eau des composés ioniques  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  et  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$  par exemple, ne s'effectuent plus suivant la proportion 1/1, rendant cette démarche non pertinente dans ce contexte. Malheureusement, dans la plupart des cas, ces assimilations se transforment parfois en contrat didactique implicite entre les deux parties sans que l'enseignant ne s'en rende compte.

Nos résultats montrent aussi que certains élèves sont incapables de prendre des bonnes décisions face à un problème bien qu'ils perçoivent la présence des anomalies dans le problème. Constat fait aussi par Lubin et al. (2012) où, malgré les bons résultats (75 % de bonne réponse) obtenus par les élèves lors de l'acquisition des concepts de dizaine et d'unité en mathématiques avec la méthode par contrôle des pièges, certains d'entre eux continuaient à tomber dans les pièges. Selon ces chercheurs, les apprenants étaient incapables d'inhiber la connaissance antérieure qu'ils ont de la chaîne numérique (le nombre le plus grand est celui qui est le plus important dans la chaîne numérique) pour activer la nouvelle règle qu'ils venaient d'apprendre concernant l'équivalence « 10 unités = une dizaine » malgré l'accent mis sur les pièges à éviter. D'où la nécessité de toujours renforcer et réviser cette nouvelle stratégie d'apprentissage tout au long de l'année scolaire dans le but de l'automatiser chez les apprenants.

#### **4. Proposition pour l'enseignement**

Les résultats obtenus dans le cadre de la présente étude montrent que l'apprentissage d'un concept passe aussi par un contrôle de ses intuitions et de ses habitudes interprétatives pour favoriser un changement de prévalence conceptuelle. À la lumière de ces résultats, nous suggérons aux enseignants d'éviter de combattre les croyances premières des apprenants, car les résultats des recherches en neurodidactique des sciences montrent que ces croyances persistent et coexistent avec les nouvelles connaissances apprises dans le cerveau tout le long de la vie. Les résultats obtenus dans cette recherche mettent également en lumière les erreurs commises par les apprenants lorsqu'ils acquièrent la notion de concentration chimique et dont il faut tenir compte pour améliorer son enseignement et son apprentissage.

Pour ce faire, le modèle de prévalence conceptuelle propose aux enseignants de donner, dès le départ, les bases des connaissances scientifiques que l'on souhaite voir émerger chez les apprenants pour qu'elles entrent très rapidement dans la course avec leurs idées préconçues. Par la suite, il s'agit d'entraîner les apprenants à reconnaître les circonstances dans lesquelles ils devraient résister à utiliser leurs idées préconçues et mécanismes routiniers des résolutions des problèmes développés durant l'apprentissage au profit plutôt de l'emploi des connaissances scientifiques apprises et adaptées à la circonstance. La résistance au recours permanent des idées préconçues et mécanismes routiniers de pensée est favorisée dans la pratique par la création des alertes verbales ou des signaux qui permettent de mettre en garde l'apprenant de l'existence d'un piège qu'il doit éviter et mobiliser ainsi la conception pertinente.

L'automatisation de ces réflexes inhibiteurs grâce aux répétitions de la démarche va induire chez l'apprenant un changement de prévalence conceptuelle et non pas la conception elle-même, en freinant l'augmentation du statut donné aux conceptions non appropriées dans un contexte donné (Potvin, 2021 ; Potvin, 2018 ; Potvin & Cyr, 2017). Ces répétitions ne doivent pas seulement être ponctuelles, mais elles doivent se faire régulièrement tout au long de l'année scolaire et dans des situations opérationnelles variées pour convaincre le cerveau de leur utilité (Dehaene, 2018).

## **CONCLUSION GÉNÉRALE**

Dans cette recherche, il était question pour nous d'évaluer l'impact d'un apprentissage basé sur le modèle de prévalence conceptuelle sur les difficultés rencontrées par les apprenants camerounais des séries scientifiques de l'enseignement secondaire général francophone lorsqu'ils déterminent la concentration d'une espèce chimique dans une solution aqueuse. Pour ce faire, nous avons identifié à l'aide d'un questionnaire papier-crayon, à la phase du pré-test, les difficultés rencontrées par les apprenants ainsi que les causes des raisonnements qui conduisent aux réponses erronées qu'ils proposent lorsqu'ils résolvent les situations conceptuellement problématiques impliquant la concentration d'une espèce chimique en solution aqueuse. Après avoir identifié parmi les élèves interrogés à la phase du pré-test ceux qui étaient éligibles au test final, nous les avons répartis en deux groupes équivalents (groupe d'intervention et groupe témoin), puis procédé à l'implantation des différentes activités de remédiation que nous avons élaborées. Le groupe d'intervention a été soumis aux activités d'apprentissage portant sur la construction du concept de concentration d'une espèce chimique en solution en utilisant la prévalence conceptuelle comme mode de transposition didactique et le groupe témoin a été également soumis aux mêmes activités d'apprentissage, mais en utilisant plutôt les conflits cognitifs comme mode principal de transposition didactique. Enfin, nous avons évalué à l'aide du même questionnaire, à la phase du post-test, l'impact desdites activités sur les scores des apprenants lorsqu'ils sont de nouveau interrogés sur des questions liées à la concentration d'une espèce chimique en solution. Lors de cette évaluation, nous avons calculé la moyenne du gain conceptuel par question au sein de chaque groupe afin de les comparer pour identifier le groupe qui enregistre le plus de gain possible. Le gain conceptuel étant la fréquence de réponses incorrectes avant l'activité de remédiation qui deviennent correctes après ladite activité.

Les résultats obtenus à la phase du pré-test de la présente recherche montrent que parmi les difficultés identifiées, les principales sont : la détermination incorrecte des concentrations des espèces chimiques dans une solution lorsque la dissolution ne s'effectue plus suivant la proportion 1/1 ; l'incapacité des apprenants à faire fonctionner la formule de calcul de la concentration d'une solution ( $C = n/V$ ) lorsqu'il s'agit de la détermination de la concentration d'une espèce chimique en solution ; la mobilisation incorrecte du caractère intensif de la grandeur concentration chimique et la détermination incorrecte des concentrations des espèces chimiques dans une solution diluée. Les causes des raisonnements erronés menés par les élèves qui éprouvent lesdites difficultés sont

extrêmement diverses. Ces raisonnements erronés sont causés par la présence des conceptions alternatives dans la mémoire des apprenants dans la plupart des cas. Ils sont aussi liés au recours permanent par les apprenants aux cadres routiniers interprétatifs. Ils sont présumément causés par la façon dont la concentration chimique est transposée par certains acteurs du système éducatif ou par l'incapacité des apprenants à identifier les circonstances où ils doivent résister à l'utilisation des conceptions qui ne sont plus pertinentes dans ces contextes. Ces raisonnements erronés sont également liés aux manques de connaissances conceptuelles sur le concept de concentration chimique lui-même ainsi que les notions qui s'imbriquent autour de lui. Dans une infime de cas, ils sont aussi dus à une mauvaise coordination conceptuelle des notions acquises au cours de la conceptualisation de la concentration chimique et plus précisément de la concentration d'une espèce chimique en solution. Au travers de ces résultats, nous avons validé la première hypothèse secondaire de cette recherche à savoir : « Les élèves camerounais des classes de séries scientifiques de l'enseignement secondaire général, à travers leurs mécanismes de raisonnement, rencontrent les difficultés d'ordres de carence, ontologique, épistémologique et didactique lorsqu'ils répondent aux questions liées à la concentration d'une espèce chimique en solution ».

Les résultats issus de la phase du post-test de la présente recherche montrent que comparativement à l'apprentissage basé essentiellement sur les conflits cognitifs, l'apprentissage basé sur la prévalence conceptuelle a mieux amélioré, de manière significative, les scores des apprenants ayant des difficultés pour déterminer correctement la concentration d'une espèce chimique en solution. D'où la validation de la deuxième hypothèse secondaire de cette recherche à savoir : « Les activités de remédiation basées sur des conceptions prévalentes améliorent significativement les scores des apprenants des classes de séries scientifiques de l'enseignement secondaire général lorsqu'ils sont de nouveau interrogés sur des questions liées à la concentration d'une espèce chimique en solution, comparativement aux activités de remédiation basées principalement sur les conflits cognitifs ».

Ainsi, les résultats obtenus dans le cadre de cette recherche ont permis d'établir qu'un apprentissage basé sur le modèle de prévalence conceptuelle permet aux apprenants camerounais des séries scientifiques de l'enseignement secondaire général francophone de mieux surmonter les difficultés qu'ils rencontrent lors de la détermination de la concentration d'une espèce chimique en solution. Ces résultats mettent en lumière une nouvelle démarche d'apprentissage des concepts qui peut servir comme stratégie de



remédiation à certaines erreurs dans le processus d'enseignement-apprentissage dans le contexte camerounais et bien d'autres contextes similaires. Ils mettent aussi en évidence la diversité des concepts théoriques nouveaux en didactique qu'on doit intégrer dans les curricula de formation des enseignants et du système éducatif camerounais pour faciliter leurs implémentations en classes. Ceci dans le but de rendre l'apprentissage plus efficace au niveau des élèves. Ils mettent également en lumière un outil de diagnostic des difficultés des élèves plus performant (test à trois paliers) comparativement aux tests à choix multiples simple (test à un palier) régulièrement utilisés. Car les tests à trois paliers permettent de catégoriser les difficultés d'apprentissage des concepts en fonction de leurs causes afin d'optimiser l'efficacité des activités de remédiation qui seront proposées par la suite.

Dans nos recherches futures, nous pourrions tester les élèves à long terme afin de juger son efficacité. De plus, il sera intéressant d'étendre cette recherche à d'autres concepts en chimie pour vérifier si les techniques de diagnostic des difficultés d'apprentissage et de remédiation que nous avons proposées fonctionnent dans d'autres contextes.

## **BIBLIOGRAPHIE**

- Adadan, E. & Savasci, F. (2012). An analysis of 16–17-year-old students' understanding of solution chemistry concepts using a two-tier diagnostic instrument. *International Journal of Science Education*, 34(4), pp. 513-544. <https://doi:10.1080/09500693.2011.636084>
- Agogo, P. O. & Omagbu, M. O. (2014). Identification of Students' Perceived Difficult Concepts in Senior Secondary School Chemistry in Oju Local Government Area of Benue State, Nigeria. *Global Educational Research Journal*, 2(4), 44-49.
- Alexandre, D. (2017). *Les méthodes qui font réussir les élèves* (4<sup>e</sup> éd.). ESF éditeur.
- Allaire-Duquette, G. (2018). *Relation entre le contrôle inhibiteur et les difficultés des élèves à mobiliser les conceptions scientifiques* [Thèse de doctorat, Université du Québec à Montréal]. Thesis. <https://archipel.uqam.ca/16438/>
- Ambomo, N. A. (2022). *conceptions des apprenants sur la conduction électrique dans une pile électrochimique: comparaison de deux séquences d'enseignement/apprentissage sur la conceptualisation du phénomène par les apprenants de classe de Première scientifique* [Thèse de doctorat non publiée]. Université de Yaoundé 1.
- Amin, T. G., Smith, C. & Wisner, M. (2014). Student Conceptions and Conceptual Change: Three Overlapping Phases of Research. Dans N. Lederman & S. Abell (dir.), *Handbook of Research on Science Education, Volume II* (1<sup>e</sup> éd. , pp. 57-81). Routledge.
- Andersson, B. (1990). Pupils' Conceptions of Matter and its Transformations (age 12-16). *Studies in Science Education*, 18, pp. 53-85. <https://doi:10.1080/03057269008559981>
- Ango, Y. P., Tagni, J., Abéga, F. D., Nkwizin, C. C., Pountougnigni, N. A., Kagho, M., & Beidi Bai, B. (2019). *Collection l'excellence Physique Chimie 2<sup>nde</sup> C*. NMI Education.
- Astolfi, J.-P. (1992). Apprendre par franchissement d'obstacles ? *Repères*(5), 103-116.
- Astolfi, J.-P. & Brigitte, P. (1993). Obstacles et construction de situations didactiques en sciences expérimentales. *Aster*, 16(16), pp. 103-141. <https://doi:10.4267/2042/8578>
- Astolfi, J.-P. & Develay, M. (1989). *La didactique des sciences*. PUF.

- Astolfi, J.-P., Darot, E., Ginsburger-Vogel, Y. & Toussaint, J. (2008). *Mots-clés de la didactique des sciences - Repères, définitions, bibliographies*. De Boeck.
- Awomo Ateba, J. (2022). *Difficultés des élèves dans l'apprentissage du concept de réaction chimique limitée au secondaire camerounais. Contribution à une épistémologie appliquée à la construction curriculaire*. [Thèse de doctorat non publiée]. Université de Yaoundé 1.
- Awomo Ateba, J. & Ayina Bouni. (2020). Structuration des contenus dans les programmes de chimie du cycle secondaire camerounais de 1960 à 2013. Quels impacts sur les pratiques enseignantes? *Actes du deuxième colloque ADiMA*, 127-142.
- Ayina Bouni & Awomo Ateba, J. (2019). Modélisation du concept de chaleur par les jeunes apprenants du CETIC de Nsem à travers le récit comme mode de transposition didactique dans une approche par les compétences. *Syllabus*, 8(2), 144-165.
- Ayina Bouni, J.-P., Soudani, O., Soudani, M. & Ntede Nga, H. (2012). Analyse de simulations de la conduction électrique dans la pile électrochimique : modélisation de ce phénomène par les élèves. *7<sup>ème</sup> rencontres scientifiques de l'ARDiST*, 13-20
- Ayina Bouni, J.-P. (2013). *Les concepts élémentaires de la chimie entre la chimie du chimiste et la chimie de l'élève : proposition de séquences d'enseignement inspirées d'une analyse sémio-épistémologique de l'histoire de la chimie*. [Thèse de doctorat non publiée]. Université Claude Bernard Lyon 1.
- Ayina Bouni, Mouliom Ndam, E., Potvin, P. & Ntede Nga. (2021). Enseignement-apprentissage du concept de la concentration en chimie: quel impact pour une remédiation impliquant le contrôle inhibiteur ? *RISEY*, 1, 104-140.
- Bachelard, G. (1967). *La formation de l'esprit scientifique* (5<sup>e</sup> éd.). (B. d. philosophiques, Éd. & J.-M. Tremblay, Trad.). J. VRIN.
- Barlet, R. (1999). L'espace épistémologique et didactique de la chimie. *L'actualité chimique*, 23-33.
- Barth, B.-M. (2013). *L'apprentissage de l'abstraction*. RETZ.
- Barth, B.-M. (2018). L'enfant en quête de sens. Dans M. Fournier (dir), *Les Grands Penseurs de l'éducation* (pp. 133-137). Éditions Sciences Humaines.

- Bélanger, M. (2008). *Du changement conceptuel à la complexification conceptuelle dans l'apprentissage des sciences*. [Thèse de doctorat, Université de Montréal].  
Permalien. <https://doi.org/1866/6487>
- Bélanger, M. & Verreault, J.-S. (2001). Les conceptions des élèves à propos de la mole.  
*Recueil de textes didactique des sciences*.
- Belinga Bessala, S. (2010). *Didactique universitaire et formation à l'enseignement des professeurs d'université*. L'harmattan.
- Bensaude-Vincent, B. & Stengers, I. (1993). *Histoire de la chimie*. La Découverte.
- Benzidia, B., Alioua, H. A., Ouasri, A. & Abid, M. (2021). Identification des difficultés des apprenants du secondaire collégial marocain dans l'apprentissage des concepts de transformation chimique – transformation physique. *European Journal of Education studies*, 8(3), pp. 246-265. <https://doi:10.46827/ejes.v8i11.3991>
- Berg, K. (2012). A study of first-year chemistry students' understanding of solution concentration at the tertiary level. *Chemistry Education Research and Practice*, 13(1), pp. 8-16. <https://doi:10.1039/C1RP90056K>
- Berthier, J. L., Borst, G., Desnos, M. & Guilleray, F. (2018). *Les neurosciences cognitives dans la classe: Guide pour expérimenter et adapter ses pratiques pédagogiques*. Montrouge. ESF Editeur.
- Bêty, M.-N. (2010, Juin). Pont théorique entre les principaux modèles de changement conceptuel et l'enseignement des sciences au primaire. *Canadian Journal for New Scholars in Education/ Revue canadienne des jeunes chercheuses et chercheurs en éducation*, 3(1), 1-13.
- Bêty, M.-N. (2013). *Conception et mise à l'essai d'un dispositif de formation portant sur le changement conceptuel en électricité et destiné aux enseignants du primaire* [Thèse de doctorat, Université du Québec à Montréal].  
<https://archipel.uqam.ca/5904/1/D2536.pdf>.
- Blakey, E., Matthews, D., Cragg, L., Buck, J., Cameron, D., Higgins, B. & Carroll, D. J. (2020). The role of executive functions in socioeconomic attainment gaps: results from a randomized controlled trial. *Child development*.

- Bloch, H., Chemama, R., Dépret, E., Gallo, A., Leconte, P., Le NY, J.-F. & Reuchlin, M. (1999). *Grand dictionnaire de la psychologie*. Larousse.
- Boeyens-Volant, D. & Warzée, N. (2015). *Chimie générale : Exercices et méthodes*. Dunod.
- Braut Foisy, L.-M. & Masson, S. (2022). Mieux comprendre les mécanismes cérébraux d'apprentissage pour faciliter la mise en application des connaissances issues de la recherche et favoriser la réussite scolaire des élèves. *Cortica*, 1(1), 219 - 235. <https://doi.org/10.26034/cortica.2022.1956>
- Brochard-Wyart, F., Dandine, C. D., Griveau, S., Portier, R., Volatron, F. & Sevin, A. (2016). *Chimie générale*. Dunod.
- Brossard, M. (2008). Concepts quotidiens/ concepts scientifiques : réflexions sur une hypothèse de travail. *Carrefours de l'éducation*, 2(26), 67-82.
- Bruner, J. S. (1983). *Le développement de l'enfant: Savoir faire, savoir dire*. PUF.
- Brunori, A., Calba, R., Carré, S., Conraux, J.-M., Cuny, G., D'Alba, J., & Wioland, R. (2019). *Physique Chimie 1<sup>re</sup>*. Belin Education.
- Calyk, M. (2005). A cross-age study of different perspectives in solution chemistry from junior to senior high school. *International Journal of Science and Mathematics Education*, 3(4), pp. 671-696. <https://doi:10.1007/s10763-005-1591-y>
- Calyk, M., Ayas, A. & Ebenezer, J. V. (2005). A Review of Solution Chemistry Studies : Insights into Students' Conceptions. *Journal of Science Education and Technology*, 14(1), pp. 29-50. <https://doi:10.1007/s10956-005-2732-3>
- Cardellini, L. (2012). Chemistry: Why the Subject is Difficult ? *educación química*, 1-6.
- Chalmers, A. (1991). *La fabrication de la science*. (L. Découverte, Éd.). Sciences et Société.
- Chandrasegaran, A. L., Treagust, D. F. & Mocerino, M. (2007). The development of a two-tier multiple-choice diagnostic instrument for evaluating secondary school students' ability to describe and explain chemical reactions using multiple levels of representation. *Chemistry Education Research and Practice*, 8 (3), pp. 293-307. <https://doi:10.1039/B7RP90006F>
- Chang, R. & Goldsby, K. A. (2014). *Chimie des solutions* (4<sup>e</sup> éd.). (A. Arpin, & L. Papillon, Trads.). Chenelière Éducation.

- Chevallard, Y. & Johsua, M.-A. (1991). *Transposition didactique : Du savoir savant au savoir enseigné - Un exemple d'analyse de la transposition didactique*. La Pensée Sauvage.
- Chi, M. T. (2008). Three types of conceptual change : Belief revision, mental model transformation, and categorical shift. Dans S. Vosniadou (dir.), *International handbook of research on conceptual change* (1<sup>e</sup> éd., pp. 61-82). Routledge.
- Chi, M. T. & Roscoe, R. (2002). The Processes and Challenges of Conceptual Change. Dans M. Limón & L. Mason, *Reconsidering Conceptual Change : Issues in Theory and Practice* (pp. 3-27). Dordrecht. <https://doi.org/10.1007/0-306-47637-1>
- Chong, S. H., Goolamally, N. & Leong, K. E. (2019). Post-secondary Science Students' Understanding on Mole Concept and Solution Concentration. *Universal Journal of Educational Research*, 7(4), pp. 986-1000. <https://doi:10.13189/ujer.2019.070410>
- Cormier, C. (2014). *Étude des conceptions alternatives et des processus de raisonnement des étudiants de chimie du niveau collégial sur la molécule, la polarité et les phénomènes macroscopiques*. [Thèse de Doctorat, Université de Montréal] Montréal. Permalien : <https://doi.org/1866/11916>
- Dawson, C. (2014). Towards a conceptual profile: rethinking conceptual mediation in the light of recent cognitive and neuroscientific findings. *Research in science éducation*, 44, 389-414.
- DeBoer, G. E. (2000). Scientific literacy: Another look at its historical and contemporary meanings and its relationship to science education reform. *Journal of Research in Science Teaching*, 37(6), pp. 582–601. [https://doi:10.1002/1098-2736\(200008\)37:63.0.CO;2-L](https://doi:10.1002/1098-2736(200008)37:63.0.CO;2-L)
- Dehaene, S. (2018). *Apprendre ! Les talents du cerveaux, le défi des machines*. Odile Jacob.
- 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*, 12, pp. 209-235. <https://doi.org/10.4000/rdst.1174>
- Devetak, I., Vogrinc, J. & Glažar, S. A. (2009). Level, Assessing 16-Year-Old Students' Understanding of Aqueous Solution at Submicroscopic. *Research in Science Education*, 39, pp. 157-179. <https://doi:10.1007/s11165-007-9077-2>

- diSessa, A. A. (2017). Une introduction accessible à la " Connaissance par Morceaux " : Modélisation des types de connaissances et de leurs rôles dans l'apprentissage. *Éducation & Didactique*, 11(2), pp. 215-231. <https://doi.org/10.4000/educationdidactique.2781>
- Duit, R. (2009). *Bibliography – STCSE Students' and Teachers' Conceptions and Science Education*. Kiel : IPN – Leibniz Institute for Science Education.
- Duit, R. & Treagust, D. F. (2003). Conceptual change : a powerful framework for improving science teaching and learning. *International Journal of Science Education*, 25(6), pp. 671-688. <https://doi:10.1080/09500690305016>
- Dumon, A. & Mzoughi-Khadhraoui, I. (2014). Teaching chemical change modeling to Tunisian students : an "expanded chemistry triplet" for analyzing teachers' discourse. *Chemistry Education Research and Practice*, 15, pp. 70-80. <https://doi:10.1039/c3rp00126a>
- Dunbar, K. N., Fugelsang, J. A. & Stein, C. (2007). Do naïve theories ever go away? Using brain and behavior to understand changes in concepts. Dans M. C. Lovett & P. Shah (dir.), *Thinking with Data* (pp. 193-205). Psychology Press. <https://doi.org/10.4324/9780203810057>
- Festinger, L. (1957). *A theory of cognitive dissonance*. Stanford University Press.
- Flavell, J. H. (1985). Développement métacognitif. Dans J. Bideaud & M. Richelle (dir), *Psychologie développementale : problèmes et réalités* (pp. 29-41). Mardaga.
- Fortin, D. (2022). *Le cerveau, une galaxie dans votre tête: tout ce que nous savons sur le cerveau, simplifié et vulgarisé*. Presses de l'Université du Québec.
- Gandillet, E. & Le-Marechal, J.-F. (2003). Conceptions et chimie des solutions ioniques. *Acte de colloque aux 3<sup>èmes</sup> Rencontres scientifiques de l'ARDiST*, 157-164.
- Garnett, P. J., Garnett, P. & Hackling, M. W. (1995). Students' Alternative Conceptions in Chemistry: A Review of Research and Implications for Teaching and Learning. *Studies in Science Education*, 25, pp. 69-95. <https://doi:10.1080/03057269508560050>
- Gilbert, J. K. & Treagust, D. (2009). *Multiple Representations in Chemical Education*. Dordrecht, The Netherlands : Springer . <https://doi:10.1007/978-1-4020-8872-8>



- Giordan, A. (1989). Vers un modèle didactique d'apprentissage allostérique. Dans N. Bednarz & C. Garnier (dir.), *Construction des savoirs : obstacles et conflits* (pp. 240-257). Éditions Agence d'ARC.
- Giordan, A. & Vecchi, G. (2002). *L'enseignement scientifique: Comment faire pour que "ça marche"?* Delagrave.
- Goes, L. F., Chen, X., Nogueira, K. C., Fernandez, C. & Eilks, I. (2020). An analysis of the visual representation of redox reactions and related content in Brazilian secondary school chemistry textbooks. *Science Education International*, 31(3), pp. 313-324. <https://doi:10.33828/sei.v31.i3.10>
- Habiddin, H. & Mary, E. (2019). Development and Validation of a Four-Tier Diagnostic Instrument for Chemical Kinetics (FTDICK). *Indonesian Journal of Chemistry*, 19 (3), pp. 720 - 736. <https://doi:10.22146/ijc.39218>
- Halloun, S. A. (2019). *Impact d'une formation collaborative donnée à des enseignants de chimie du secondaire sur l'enseignement et l'apprentissage du concept de mole*. [Thèse de Doctorat, Université de Montréal]. [https://papyrus.bib.umontreal.ca/xmlui/bitstream/handle/1866/23554/Abou\\_Halloun\\_Simone\\_2019\\_these.pdf](https://papyrus.bib.umontreal.ca/xmlui/bitstream/handle/1866/23554/Abou_Halloun_Simone_2019_these.pdf).
- Hill, J. W., Petrucci, R. H., McCreary, T. W., Perry, S. S. & Cantin, R. (2008). *Chimie des solutions* (2<sup>e</sup> éd.). (P. Mayer, Trad.). Éditions du Renouveau Pédagogique Inc.
- Houdé, O. (2000). Inhibition and cognitive development : Object, number, categorization, and reasoning. *Cognitive development*, 15(1), pp. 63-73. [https://doi:10.1016/S0885-2014\(00\)00015-0](https://doi:10.1016/S0885-2014(00)00015-0)
- Houdé, O. (2007). Le rôle positif de l'inhibition dans le développement cognitif de l'enfant. *Le Journal des psychologues*, 1(244), 40-42.
- Houdé, O. (2014). *Apprendre à résister*. Le Pommier.
- Houdé, O. (2014). *Le raisonnement*. Presses Universitaires de France. <https://doi.org/10.3917/puf.houde.2014.01>
- Houdé, O. (2019). *3-System Theory of the Cognitive Brain : A Post-Piagetian Approach to Cognitive Development*. Routledge.

- Houdé, O., Zago, L., Mellet, E., Moutier, S., Pineau, A., Mazoyer, B., & Tzourio-Mazoyer, N. (2000). Shifting from the Perceptual Brain to the Logical Brain: The Neural Impact of Cognitive Inhibition Training. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 12(5), pp. 721–728. <https://doi.org/10.1162/089892900562525>
- IUPAC. (2019). International Union of Pure and Applied Chemistry. Dans A. D. McNaught, A. Wilkinson & S. Chalk (dir.), *Compendium of Chemical Terminology* (2<sup>e</sup> éd., p. 581). Gold Book. <https://doi.org/10.1351/goldbook.D01806>
- Johnstone, A. H. (1982). Macro- and micro-chemistry. *School Science Review*, 64, 377–379.
- Jonnaert, P. & Vander Borgh, C. (2008). *Créer des conditions d'apprentissage: un cadre de référence socioconstructiviste pour une formation didactique des enseignants* (3<sup>e</sup> éd.). De Boeck Supérieur.
- Kaltakci Gurel, D., Eryilmaz, A. & McDermott, C. L. (2015). A Review and Comparison of Diagnostic Instruments to Identify Students' Misconceptions in Science. *Eurasia Journal of Mathematics, Science & Technology Education*, 11(5), pp. 989-1008. <https://doi:10.12973/eurasia.2015.1369a>
- Kazembe, T. C. & Musarandega, A. (2012). Student Performance in A-level Chemistry Examinations in Makoni District, Zimbabwe. *Eurasian Journal of Physics and Chemistry Education*, 4(1), 2-29.
- 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), pp. 24-34. <https://doi:10.1039/B901457H>
- Kuhn, T. S. (1972). *La structure des révolutions scientifiques*. (D. Montazeaud, Trad.). Champs Flammarion.
- Kumi-Manu, R. N. (2021). Concept Cartoon as a Teaching Technique for Conceptual Change: A Ghanaian Junior High School Experience. *American Journal of Educational Research*, 9(9), pp. 587-599. <https://doi:10.12691/education-9-9-5>
- Legendre, M. (1994). Problématique de l'apprentissage et de l'enseignement des sciences au secondaire : un état de la question. *Revue des sciences de l'éducation*, 20(4), pp. 657–677. <https://doi.org/10.7202/031761ar>
- Legendre, R. (2000). *Dictionnaire actuel de l'éducation* (2<sup>e</sup> éd.). Guérin.

- Li, X., Li, Y. & Wang, W. (2021). Long-Lasting Conceptual Change in Science Education: The Role of U-shaped Pattern of Argumentative Dialogue in Collaborative Argumentation. *Science & Education*. <https://doi.org/10.1007/s11191-021-00288-x>
- Limón, M. & Mason, L. (2002). *Reconsidering Conceptual Change : Issues in Theory and Practice*. Dordrecht. <https://doi.org/10.1007/0-306-47637-1>
- Lubin, A., Lanoé, C., Pineau, A. & Rossi, S. (2012, Decembre). Apprendre à inhiber : une pédagogie innovante au service des apprentissages scolaires fondamentaux (mathématiques et orthographe) chez des élèves de 6 à 11 ans. *Neuroéducation*, 1(1), 55-84.
- Malenfant-Robichaud, G. (2018). *Inhibition et capacité à surmonter certaines conceptions alternatives en chimie* [Mémoire de master, Université du Québec à Montréal]. Thesis. <https://archipel.uqam.ca/16438/>
- Mason, L. & Zaccoletti, S. (2021). Inhibition and Conceptual Learning in Science: a Review of Studies. *Educational Psychology Review*, 33, pp. 181–212. <https://doi.org/10.1007/s10648-020-09529-x>
- Masson, S. (2014). Cerveau, apprentissage et enseignement: mieux connaître le cerveau peut-il nous aider à mieux enseigner ? *Éducation Canada*, 54(4), 40-43.
- Masson, S. (2007). Enseigner les sciences en s'appuyant sur la neurodidactique des sciences. Dans P. Potvin, M. Riopel & S. Masson (dir.), *Regards multiples sur l'enseignement des sciences* (pp. 308-321). MultiMondes.
- Masson, S. (2012). *Etude des mécanismes cérébraux liés à l'expertise scientifique en électricité à l'aide de l'imagerie par résonance magnétique fonctionnelle* [Thèse de Doctorat, Université du Québec]. <https://archipel.uqam.ca/4876/1/D2287.pdf>
- Masson, S. (2015). Les apports de la neuroéducation à l'enseignement: des neuromythes aux découvertes actuelles. *Approche neuropsychologique des apprentissages chez l'enfant*, 134, 11-22.
- Masson, S. (2016). Pour que s'activent les neurones. *Les Cahiers pédagogiques*(527), 18-19.
- Mzoughi-Khadhraoui, I., Dumon, A., & Ayadi-Trabelsi, M. (2011). Le savoir à enseigner relatif à la transformation chimique en première année de lycée en Tunisie et sa

- perception par les enseignants. *Revista electrónica de enseñanza de las ciencias*, 10(1), 153-177.
- Novick, S. & Nussbaum, J. (1981). Pupils' understanding of the particulate nature of matter: A cross-age study. *Science Education*, 65, pp. 187-196.  
<https://doi.org/10.1002/sce.3730650209>
- Organisation de Coopération et de Développement Économique. (2007). *Comprendre le cerveau : vers une nouvelle science de l'apprentissage*. Éditions de l'OCDE.
- Organisation de Coopération et de Développement Économique. (2002). *Comprendre le cerveau : vers une nouvelle science de l'apprentissage*. Éditions de l'OCDE.
- Orange, C. & Orange Ravachol, D. (2013). Le concept de représentation en didactique des sciences : sa nécessaire composante épistémologique et ses conséquences. *Recherches en Education*(17), 46-61.
- Ouasri, A. & Ravanis, K. (2020). Apprentissage des élèves de collège marocain du concept d'ion en lien avec la trame conceptuelle (atome, molécule, électron, charge). *European Journal of Alternative Education Studies*, 5, pp. 71-94.  
<https://doi.org/10.5281/zenodo.3726358>
- Ouertatani, L. & Dumon, A. (2007). Évolution historique des concepts d'acide et de base. *l'actualité chimique*(306), 41-48.
- Pellaud, F., Eastes, R.-E. & Giordan, A. (2005). Un modèle pour comprendre l'apprendre: Le modèle allostérique. *Gymnasium Helveticum*.
- Perrenoud, P. (1993). Curriculum: le formel, le réel, le caché. Dans J. Houssaye & Y. Abernot (dir.), *La pédagogie : une encyclopédie pour aujourd'hui* (pp. 61-76). ESF.
- Perrenoud, P. (1998). La transposition didactique à partir de pratiques : des savoirs aux compétences. *Revue des sciences de l'éducation*, 24(3), 487-514.
- Perrin, J. (2012). *Les atomes*. Nouveau Monde.
- Piaget, J. (2005). *L'épistémologie génétique*. Presses Universitaires de France.  
<https://doi.org/10.3917/puf.piage.2005.01>
- Piaget, J. W. (1968). *La psychologie de l'enfant*. Presses Universitaires de France.

- Plumat, J., Vanhoolandt, C. & Mober, C. (2019). Neurodidactique en sciences physiques: premières approches à l'UNamur. *Actes de la première Journée d'études IRDENa*. 38-46.
- Posner, G. J., Strike, K. A., Hewson, P. W. & Gertzog, W. A. (1982). Accommodation of a scientific conception: Toward a theory of conceptual change. *Science Education*, 66(2), 2011-227.
- Potvin, P. (2021). Response of science learners to contradicting information: a review of research. *Studies in Science Education*.  
<https://doi.org/10.1080/03057267.2021.2004006>
- Potvin, P. (2013). Proposition for improving the classical models of conceptual change based on neuroeducational evidence: conceptual prevalence. *Neuroeducation*, 2(1), 16-43.
- Potvin, P. (2018). *Faire apprendre les sciences et la technologie à l'école: épistémologie, didactique, sciences cognitives et neurosciences au service de l'enseignant*. PUL.
- Potvin, P. & Cyr, G. (2017). Toward a durable prevalence of scientific conceptions : Tracking the effects of two interfering misconceptions about buoyancy from preschoolers to science teachers. *JRST*, 54, 1121-1142.  
<https://doi.org/10.1002/tea.21396>
- Potvin, P., Malenfant-Robichaud, G., Cormier, C. & Masson, S. (2020a). Coexistence of Misconceptions and Scientific Conceptions in Chemistry Professors : A Mental Chronometry and fMRI Study. *Frontiers in Education*, 5.  
doi:10.3389/feduc.2020.542458
- Potvin, P., Nenciovici, L., Malenfant-Robichaud, G., Thibault, F., Sy, O., Mahhou, M. A., ... Chastenay, P. (2020). Models of conceptual change in science learning: establishing an exhaustive inventory based on support given by articles published in major journals. *Studies in Science Education*, 1(1), pp. 157-211.  
<https://doi.org/10.1080/03057267.2020.1744796>
- Potvin, P., Riopel, M. & Masson, S. (2007). *Regards multiples sur l'enseignement des sciences*. Éditions MultiMondes.

- Potvin, P., Sauriol, É. & Riopel, M. (2015). Experimental Evidence of the Superiority of the Prevalence Model of Conceptual Change Over the Classical Models and Repetition. *Journal of Research in Science Teaching*, 52(8), pp. 1082-1108. [https://doi:10.1002/tea.21235](https://doi.org/10.1002/tea.21235)
- Potvin, P., Turmel, É. & Masson, S. (2014). Linking neuroscientific research on decision making to the educational context of novice students assigned to a multiple-choice scientific task involving common misconceptions about electrical circuits. *Frontiers in Human Neuroscience*, 8(14), 1-13.
- Pullman, B. (1995). *L'atome dans l'histoire de la pensée humaine*. Fayard.
- Quílez, J. (2019). A categorisation of the terminological sources of student difficulties when learning chemistry. *Studies in Science Education*, 55(2), pp. 121-167. [https://doi:10.1080/03057267.2019.1694792](https://doi.org/10.1080/03057267.2019.1694792)
- Raby, C. & Viola, S. (2016). *Modèles d'enseignement et théories d'apprentissage : pour diversifier son enseignement* (2<sup>e</sup> éd.). Les Éditions CEC.
- Raviolo, A., Farré, A. S. & Traiman-Schroh, N. (2021). Students' understanding of molar concentration. *Chemistry Education Research and Practice*, 22(2), pp. 486-497. [https://doi:10.1039/d0rp00344a](https://doi.org/10.1039/d0rp00344a)
- Rees, S. & Newton, D. (2020). *Creative Chemists: Strategies for Teaching and Learning* (éd. 1st). Royal Society of Chemistry. <https://doi.org/10.1039/9781839161094>
- Reuter, Y., Cohen-Azria, C., Daunay, B., Delcambre, I. & Lahanier-Reuter, D. (2007). *Dictionnaire des concepts fondamentaux des didactiques*. De Boeck Supérieur. <https://doi.org/10.3917/dbu.reute.2013.01>
- Rey, A. (2010). *Dictionnaire historique de la langue française*. Le Robert.
- Ribaupierre, A. (2007). Modèles néo-piagétiens du développement cognitif et perspective psychométrique de l'intelligence : y a-t-il convergence ? *L'année psychologique*, 107(2), pp. 257-302.
- Robert, L. (2010). *Dictionnaire historique de la langue française*. Le Robert.
- Rogalski, J. (2015). *Didactique et cognition, de Vygotsky à Dehaene ?* IREM de Paris, Université Paris Diderot.

- Samain Tchana, N., Ngafi, G., Mbiamy, M., Fadanka, E., Ndongo, B., Tchokoté, S. & Kouam, P. (2018). *Physique Chimie Technologie 3<sup>ème</sup>*. TINCYD.
- Şen, Ş. & Yilmaz, A. (2017). The development of a three-tier chemical bonding concept test. *Journal of Turkish Science Education*, 14(1), pp. 110-126. [https://doi:10.12973/tused.10193a](https://doi.org/10.12973/tused.10193a)
- Shwartz, Y., Ben-Zvi, R. & Hofstein, A. (2005). The importance of involving high-school chemistry teachers in the process of defining the operational meaning of ‘chemical literacy’. *International Journal of Science Education*, 27(3), pp. 323–344. [https://doi:10.1080/0950069042000266191](https://doi.org/10.1080/0950069042000266191)
- St-Yves, A. (1982). *Psychologie de l'apprentissage-enseignement : Une approche individuelle ou de groupe* (éd. 1<sup>e</sup>). Presses de l'Université du Québec. [https://doi:https://www.jstor.org/stable/j.ctv18pgsn3](https://doi.org/https://www.jstor.org/stable/j.ctv18pgsn3)
- Taber, K. S. (2001). Building the structural concepts of chemistry : Some considerations from educational research. *Chemistry Education : Research and Practice in Europe*, 2(2), 123-158.
- 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), pp.156-168. [https://doi:10.1039/C3RP00012E](https://doi.org/10.1039/C3RP00012E)
- Taber, K. S. (2019). *The Nature of the Chemical Concept: Re-constructing Chemical Knowledge in Teaching and Learning*. Royal Society of Chemistry. <https://doi.org/10.1039/9781788013611>
- Talanquer, V. (2006). Commonsense Chemistry : A Model for Understanding Students’ Alternative Conceptions. *Journal of Chemical Education*, 83(5), 811-816.
- Talanquer, V. (2011). Macro, Submicro, and Symbolic : The many faces of the chemistry “triplet”. *International Journal of Science Education*, 33(2), pp. 179-195. [https://doi:10.1080/09500690903386435](https://doi.org/10.1080/09500690903386435)
- Talanquer, V. (2014). Chemistry Education : Ten Heuristics To Tame. *Journal of Chemical Education*, 91, pp. 1091–1097. [https://doi:10.1021/ed4008765](https://doi.org/10.1021/ed4008765)

- Tamir, P. (1971). An alternative approach to the construction of multiple choice test items. *Journal of Biological Education*, 5, pp. 305-307. <https://doi:10.1080/00219266.1971.9653728>
- Tardif, J. (1997). *Pour un enseignement stratégique : l'apport de la psychologie cognitive*. Logiques.
- Thouin, M. (2016). *Tester et enrichir sa culture scientifique et technologique* (2<sup>e</sup> éd.). Multimondes.
- Toulmin, S. (1972). *Human Understanding, Part 1 : The Collective Use and Evolution of Concepts*. Clarendon Press.
- Treagust, D. F. (1988). Development and use of diagnostic tests to evaluate students' misconceptions in science. *International Journal of Science Education*, 10(2), pp. 159-169. <https://doi:10.1080/0950069880100204>
- Treagust, D. F. & Duit, R. (2009). Multiple Perspectives of Conceptual Change in Science and the Challenges Ahead. *Journal of Science and Mathematics Education in Southeast Asia*, 32(2), 89-104.
- Tsai, C.-C. & Chou, C. (2002). Diagnosing students' alternative conceptions in science. *Journal of Computer Assisted Learning*, 18, 157-165.
- Tümay, H. (2016). Reconsidering learning difficulties and misconceptions in chemistry: Emergence in chemistry and its implications for chemical education. *Chemistry Education Research and Practice*, pp. 1-15. <https://doi:10.1039/x0xx00000x>
- Van Lerberghe, L. (2017). *Des conceptions naïves aux conceptions expertes grâce à un apprentissage alliant contrôle inhibiteur et conflit cognitif. Mise en application au travers de l'acquisition du concept de concentration massique en 3<sup>ème</sup> général option sciences* [Mémoire de Master non publié]. Université catholique de Louvain.
- Vergnaud, G. (1990). La théorie des champs conceptuels. *Recherche en didactique des mathématiques*, 10(23), 133-170.
- Vosniadou, S. (1994). Capturing and modeling the process of conceptual change. *Learning and Instruction*, 4, 45-69.



- Vosniadou, S. (2008). Conceptual change research : An introduction. Dans S. Vosniadou (dir.), *International handbook of research on conceptual change* (1<sup>e</sup> éd., pp. xiii-xxviii). Routledge.
- Vygotski, L. S. (2019). *Pensée et langage* (5<sup>e</sup> éd.). (F. Sève, Trad.). La Dispute.
- Willame, B. (2016). Difficultés d'apprentissage du concept de concentration en chimie : impact de remédiations impliquant des conflits cognitifs. *9<sup>e</sup> rencontres scientifiques de l'ARDiST*, 1-6.
- Willame, B. (2017). *Construction d'outils didactiques pour remédier aux difficultés d'apprentissage du concept de concentration en chimie dans le secondaire supérieur: Appui sur les neurosciences cognitives* [Thèse de doctorat, Université de Namur]. <https://researchportal.unamur.be>
- Willame, B. & Snauwaert, P. (2015). Les difficultés rencontrées dans l'apprentissage du concept de concentration en chimie. *Spirale - Revue de Recherches en Education*(55), 177-205.
- Willame, B. & Snauwaert, P. (2016). Et si nous mettions du sel dans l'eau – Comment évoluent les conceptions des apprenants au fur et à mesure des apprentissages en chimie? *Spectre, Revue de l'Association pour l'enseignement de la science et de la technologie au Québec*, 45(3), 18-21.
- Willame, B. & Snauwaert, P. (2018). Entraînement au contrôle inhibiteur et apprentissage en chimie dans le secondaire supérieur : Favoriser un changement de prévalence conceptuelle. *Neuroéducation*, 5(2), 73-92.
- Woldeamanuel, M., Atagana, H. & Engida, T. (2014). What Makes Chemistry Difficult ? *AJCE*, 4(2), 31-43.

**ANNEXES**

## Annexe A : questionnaire du pré-test et du post-test

### Identification de l'apprenant

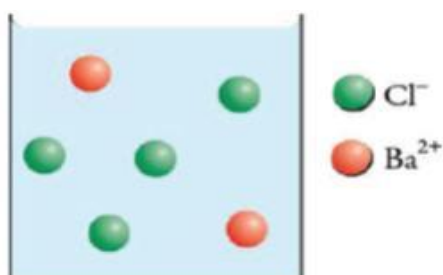
Nom et prénom : \_\_\_\_\_

Age: \_\_\_\_\_ Classe: \_\_\_\_\_ Établissement: \_\_\_\_\_

**Consignes** : lire attentivement puis mettre un cercle autour de la lettre qui correspond à la bonne réponse de chaque question posée. Justifier votre réponse puis encrer la lettre qui correspond au niveau de confiance que vous accordez à votre réponse. Chaque question posée a une seule bonne réponse exceptée la question Q8 où plusieurs réponses sont admises.

**NB** : les questions sont centrées sur la détermination des concentrations des espèces chimiques (ions et molécules) en solution aqueuse.

Q1) Le schéma ci-dessous représente une solution aqueuse constituée d'ions chlorures ( $\text{Cl}^-$ ) et d'ions baryums ( $\text{Ba}^{2+}$ ). Le volume de la solution est  $V = 0,20 \text{ L}$ .



1.1) Quelles sont les concentrations (en mol/L) des ions présents dans cette solution ? Considérez que chaque sphère représente 0,10 mol de l'ion en solution.	a) $[\text{Cl}^-] = 0,50 \text{ mol/L}$ et $[\text{Ba}^{2+}] = 0,50 \text{ mol/L}$ b) $[\text{Cl}^-] = 2 \text{ mol/L}$ et $[\text{Ba}^{2+}] = 1 \text{ mol/L}$ c) $[\text{Cl}^-] = 0,4 \text{ mol/L}$ et $[\text{Ba}^{2+}] = 0,2 \text{ mol/L}$ d) $[\text{Cl}^-] = 4 \text{ mol/L}$ et $[\text{Ba}^{2+}] = 2 \text{ mol/L}$ e) Autre réponse à préciser...
1.2) Justifier votre réponse :	
1.3) Confiance accordée à votre réponse :	a) Sûre b) Pas sûre

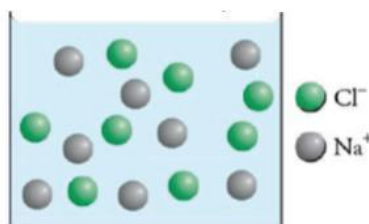
Q2) On mélange un volume  $V = 0,35$  L d'une solution de NaCl de concentration égale à  $1,66$  mol/L avec un volume  $V = 0,15$  L d'une solution de NaCl de concentration égale à  $0,89$  mol/L.

2.1) Quelles sont les concentrations (en mol/L) des ions $\text{Na}^+$ et $\text{Cl}^-$ dans la solution finale obtenue ?	a) $[\text{Cl}^-] = 1,42$ mol/L et $[\text{Na}^+] = 1,42$ mol/L b) $[\text{Cl}^-] = 2,55$ mol/L et $[\text{Na}^+] = 2,55$ mol/L c) $[\text{Cl}^-] = 0,71$ mol/L et $[\text{Na}^+] = 0,71$ mol/L d) $[\text{Cl}^-] = 0,58$ mol/L et $[\text{Na}^+] = 0,13$ mol/L e) Autre réponse à préciser.....
2.2) Justifier votre réponse :	
2.3) Confiance accordée à votre réponse :	a) Sûre b) Pas sûre

Q3) On dissout dans l'eau une masse de 5 g de sulfate de potassium ( $\text{K}_2\text{SO}_4$ ) et on obtient une solution de volume égal à 0,1 L.

3.1) Quelle est la concentration (en mol/L) de l'ion potassium ( $\text{K}^+$ ) dans cette solution sachant que la masse molaire de $\text{K}_2\text{SO}_4$ est $M_{\text{K}_2\text{SO}_4} = 174$ g/mol ?	a) $[\text{K}^+] = 0,28$ mol/L b) $[\text{K}^+] = 0,028$ mol/L c) $[\text{K}^+] = 0,57$ mol/L d) $[\text{K}^+] = 50$ mol/L e) Autre réponse à préciser.....
3.2) Justifier votre réponse :	
3.3) Confiance accordée à votre réponse :	a) Sûre b) Pas sûre

Q4) Le schéma ci-dessous représente une solution aqueuse de NaCl de volume égal à 0,40 L. On ajoute dans cette solution un volume d'eau égal à 0,10 L.



4.1) Quelle est la concentration (en mol/L) de l'ion sodium ( $\text{Na}^+$ ) dans la solution finale obtenue ? Considérez que chaque sphère représente 0,10 mol de l'ion en solution.	a) $[\text{Na}^+] = 0,80 \text{ mol/L}$ b) $[\text{Na}^+] = 2 \text{ mol/L}$ c) $[\text{Na}^+] = 1,6 \text{ mol/L}$ d) $[\text{Na}^+] = 8 \text{ mol/L}$ e) Autre réponse à préciser.....
4.2) Justifier votre réponse :	
4.3) Confiance accordée à votre réponse :	a) Sûre b) Pas sûre

Q5) On mélange deux volumes égaux d'une même solution de chlorure de sodium NaCl de concentration égale à 0,10 mol/L.

5.1) Quelle est la concentration (en mol/L) de l'ion chlorure ( $\text{Cl}^-$ ) dans la solution finale obtenue ?	a) $[\text{Cl}^-] = 0,20 \text{ mol/L}$ b) $[\text{Cl}^-] = 0,05 \text{ mol/L}$ c) $[\text{Cl}^-] = 0,30 \text{ mol/L}$ d) $[\text{Cl}^-] = 0,10 \text{ mol/L}$ e) Autre réponse à préciser.....
5.2) Justifier votre réponse :	
5.3) Confiance accordée à votre réponse :	a) Sûre b) Pas sûre

Q6) Soient 5 solutions aqueuses identiques (même soluté et même solvant) de concentration en ion calcium ( $\text{Ca}^{2+}$ ) égale à 0.20 mol/L. On verse dans un même récipient les 5 solutions.

6.1) Quelle est la concentration (en mol/L) de l'ion $\text{Ca}^{2+}$ dans la solution finale obtenue ?	a) $[\text{Ca}^{2+}] = 0,20 \text{ mol/L}$ b) $[\text{Ca}^{2+}] = 0,04 \text{ mol/L}$ c) $[\text{Ca}^{2+}] = 5 \text{ mol/L}$ d) $[\text{Ca}^{2+}] = 1 \text{ mol/L}$ e) Autre réponse à préciser.....
6.2) Justifier votre réponse :	
6.3) Confiance accordée à votre réponse :	a) Sûre b) Pas sûre

Q7) Une bouteille de volume égale à 1,5 L de jus Chapman contient 131 g/L de glucose ( $\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6$ ). On divise ce jus dans 3 verres de 0,5 L chacun.

7.1) Quelle est la concentration (en g/L) du glucose dans chaque verre de jus ? $M_{\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6} = 180 \text{ g/mol}$	a) $[\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6] = 43,67 \text{ g/L}$ b) $[\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6] = 262 \text{ g/L}$ c) $[\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6] = 83,33 \text{ g/L}$ d) $[\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6] = 131 \text{ g/L}$ e) Autre réponse à préciser.....
7.2) Justifier votre réponse :	
7.3) Confiance accordée à votre réponse :	a) Sûre b) Pas sûre

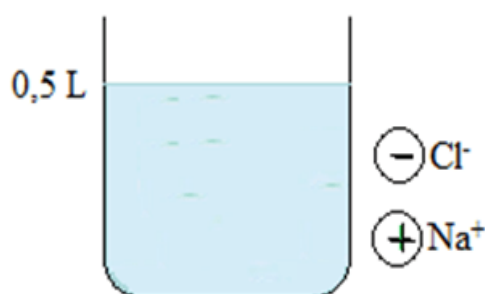
Q8) Les connaissances que vous avez utilisées pour répondre à ce questionnaire ont été apprises :

- a) À l'école
- b) Sur Internet
- c) Dans des livres ou revues scientifiques
- d) Autres à préciser.....

## Annexe B : fiche d'activités des élèves pour le cours expérimental

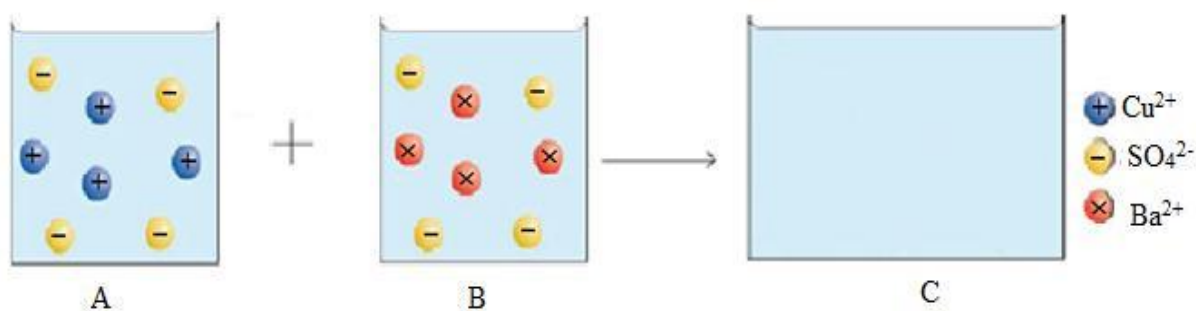
### Activité 1 : représentation iconographique des ions contenus dans une solution ionique au niveau sub-microscopique

1.1. On dissout 0,4 mol de chlorure de sodium  $\text{NaCl(s)}$  dans un bécher contenant 0,45 L d'eau et on obtient une solution de volume final égal à 0,5 L. Représenter à l'aide des sphères, les ions chlorures  $\text{Cl}^-$  ( $\ominus$ ) et les ions sodiums  $\text{Na}^+$  ( $\ominus$ ) présents dans la solution finale représentée par la figure ci-dessous.



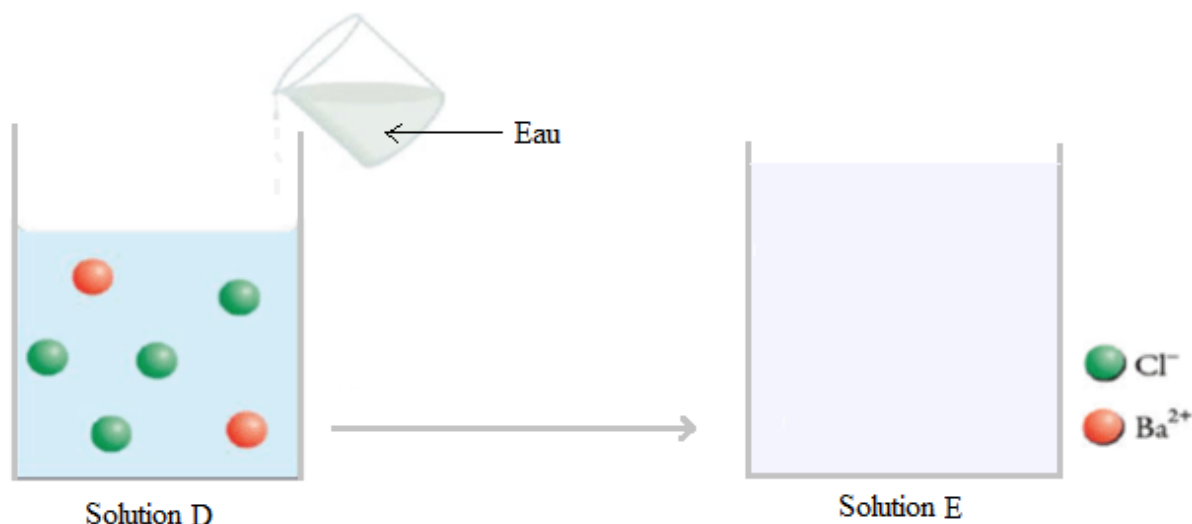
Considérer que chaque sphère représente 0,10 mol de l'ion en solution.

1.2. Une solution C est obtenue en mélangeant deux solutions aqueuses A et B contenant différents ions ( $\text{Ba}^{2+}$ ,  $\text{Cu}^{2+}$  et  $\text{SO}_4^{2-}$ ) comme l'indique le schéma ci-dessous.



Représenter les différents ions dans la solution finale C obtenue.

1.3. Une solution E est obtenue en ajoutant 200 mL d'eau dans une solution aqueuse D de chlorure de baryum ( $\text{BaCl}_2$ ) de volume égal à 500 mL comme l'indique le schéma ci-dessous.



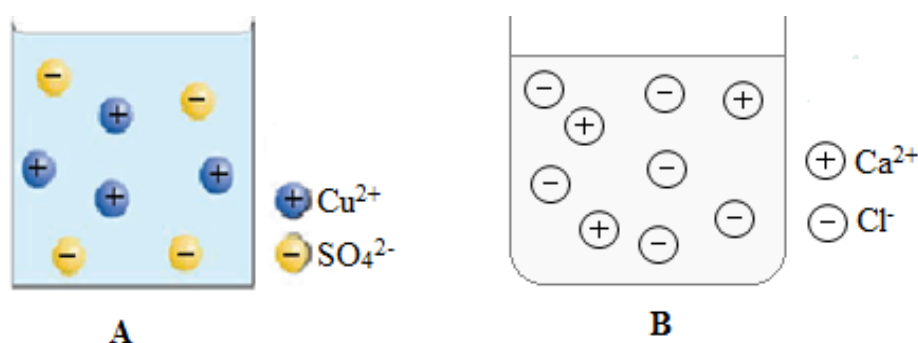
1.3.1. Comment appelle-t-on l'opération qui conduit à l'obtention de la solution E ?

1.3.2. Représenter les ions chlorures et les ions baryums dans la solution E.

### Activité 2 : écriture et équilibrage des équations de dissolution des composés ioniques dans l'eau

2.1. Écrire et équilibrer les équation-bilans de dissolution dans l'eau des composés ioniques suivants : hydroxyde de calcium (Ca(OH)<sub>2</sub>), hydroxyde de potassium (KOH), chlorure de baryum (BaCl<sub>2</sub>) et nitrate d'argent (AgNO<sub>3</sub>).

2.2. Le schéma ci-dessous représente deux solutions aqueuses A et B. La solution A est constituée d'ions cuivre II (Cu<sup>2+</sup>) et d'ions sulfates (SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>) et la solution B est constituée d'ions calciums (Ca<sup>2+</sup>) et d'ions chlorures (Cl<sup>-</sup>).



Nommer les composés ioniques dissous dans l'eau pour obtenir les solutions A et B, puis écrire leurs équation-bilans de dissolution dans l'eau.



### Activité 3 : Calcul de la quantité de matière

3.1. Compléter le tableau ci-dessous.

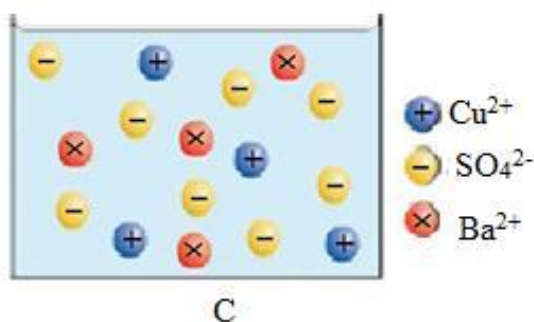
Nom de la molécule	Formule de la molécule	Masse molaire (g/mol)	Masse (g)	Quantité de matière (mol)
Glucose	$C_6H_{12}O_6$	180	12	?
Sulfate d'aluminium	$Al_2(SO_4)_3$	?	10	?
Eau	$H_2O$	18	?	55,56

On donne :

- Masse molaire de l'hydrogène :  $M_H = 1 \text{ g/mol}$  ;
- Masse molaire du carbone :  $M_C = 12 \text{ g/mol}$  ;
- Masse molaire de l'oxygène :  $M_O = 16 \text{ g/mol}$  ;
- Masse molaire d'aluminium :  $M_{Al} = 27 \text{ g/mol}$  ;
- Masse molaire du soufre :  $M_S = 32 \text{ g/mol}$ .

3.2. Pour son petit déjeuner, Joseph ajoute trois morceaux de sucre de 6 g chacun dans une tasse contenant 300 mL de thé. Le sucre est constitué principalement de glucose de formule  $C_6H_{12}O_6$ . Calculer la quantité de matière de glucose dans la tasse de thé.

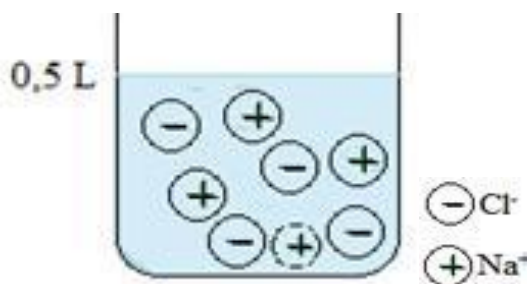
3.3. Le schéma ci-dessous représente une solution C obtenue en mélangeant deux solutions aqueuses A et B contenant différents ions ( $Ba^{2+}$ ,  $Cu^{2+}$  et  $SO_4^{2-}$ ). La solution initiale A contient les ions  $Cu^{2+}$  et  $SO_4^{2-}$  et la solution initiale B contient les ions  $Ba^{2+}$  et  $SO_4^{2-}$ . Chaque sphère représente 0,20 mol de l'ion en solution.



- 3.3.1. Calculer la quantité de matière d'ions sulfates ( $\text{SO}_4^{2-}$ ) dans la solution C et aussi sa quantité de matière dans les solutions initiales A et B.
- 3.3.2. La solution C est diluée 10 fois. Quelle est la quantité de matière d'ions  $\text{SO}_4^{2-}$  dans la nouvelle solution obtenue ? justifier votre réponse.

**Activité 4 : Calcul des concentrations des ions dans les solutions où la dissolution du soluté dans l'eau s'est faite suivant la proportion 1/1.**

- 4.1. Le schéma ci-dessous représente une solution aqueuse constituée d'ions chlorures ( $\text{Cl}^-$ ) et d'ions sodiums ( $\text{Na}^+$ ). Le volume de la solution est  $V = 0,5 \text{ L}$ .

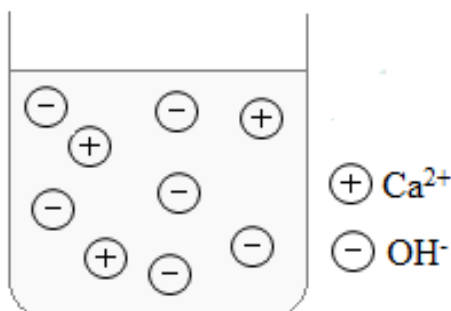


Quelles sont les concentrations (en mol/L) des ions présents dans cette solution ?  
Considérez que chaque sphère représente 0,10 mol de l'ion en solution.

- 4.2. Une solution de volume final égal à 0,5 L est obtenue en dissolvant 0,4 mol de chlorure de sodium  $\text{NaCl(s)}$  dans un bécher contenant 0,47 L d'eau. Calculer les concentrations molaires volumiques des ions dans cette solution.

**Activité 5 : Calcul des concentrations des ions dans les solutions où la dissolution du soluté dans l'eau ne se fait plus suivant la proportion 1/1.**

- 5.1. Le schéma ci-dessous représente une solution aqueuse constituée d'ions hydroxyde ( $\text{OH}^-$ ) et d'ions calcium ( $\text{Ca}^{2+}$ ).



Quelles sont les concentrations (en mol/L) des ions présents dans 500 mL de cette solution ? Considérez que chaque sphère représente 0,10 mol de l'ion en solution.

5.2. On dissout dans l'eau une masse de 22,23 g d'hydroxyde de calcium ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) et on obtient une solution de volume égal à 0,5 L. Quelles sont les concentrations (en mol/L) des ions calciums ( $\text{Ca}^{2+}$ ) et hydroxydes ( $\text{OH}^-$ ) dans cette solution ?

5.3. Le « sulfate d'alumine solution » est un produit couramment utilisé dans le traitement des eaux. Il est obtenu en dissolvant du sulfate d'aluminium anhydre de formule  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$  et de masse molaire  $M = 342$  g/mol dans l'eau distillée.

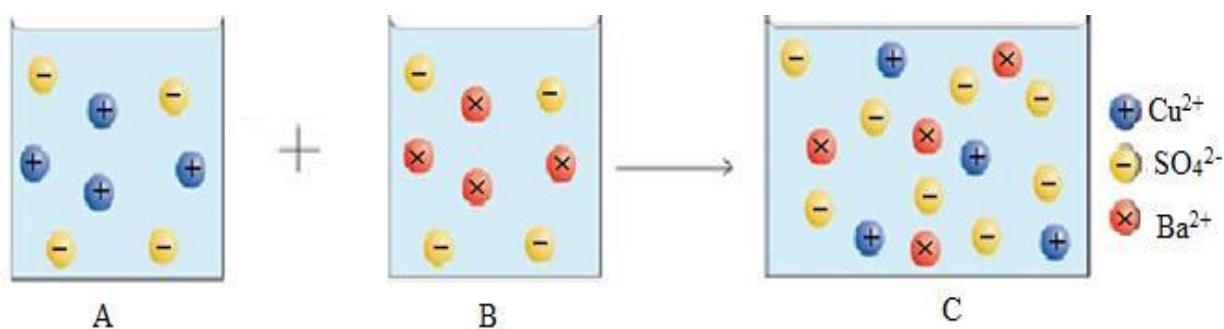
Calculer les concentrations d'ions  $\text{Al}^{3+}$  et  $\text{SO}_4^{2-}$  dans 5 L de ce produit renfermant 3,5 mol/L du sulfate d'aluminium anhydre.

On donne :

- Masse molaire de l'hydrogène :  $M_{\text{H}} = 1$  g/mol ;
- Masse molaire du carbone :  $M_{\text{Ca}} = 40$  g/mol ;
- Masse molaire de l'oxygène :  $M_{\text{O}} = 16$  g/mol ;
- Masse molaire d'aluminium :  $M_{\text{Al}} = 27$  g/mol ;
- Masse molaire du soufre :  $M_{\text{S}} = 32$  g/mol.

### Activité 6 : Calcul des concentrations des espèces chimiques dans un mélange des solutions ayant les propriétés différentes.

6.1. Une solution C est obtenue en mélangeant deux solutions aqueuses A et B contenant différentes ions ( $\text{Ba}^{2+}$ ,  $\text{Cu}^{2+}$  et  $\text{SO}_4^{2-}$ ) comme l'indique le schéma ci-dessous. Le volume de chaque solution A et B est de 500 mL.



Déterminer les concentrations des ions  $\text{Ba}^{2+}$ ,  $\text{Cu}^{2+}$  et  $\text{SO}_4^{2-}$  dans la solution C. Considérer que chaque sphère représentant l'ion en solution vaut 0,05 mol.

6.2. On mélange 500 mL d'une solution de sulfate de cuivre ( $\text{CuSO}_4$ ) de concentration égale à 0,4 mol/L avec 500 mL d'une solution de sulfate de baryum ( $\text{BaSO}_4$ ) de concentration égale à 0,4 mol/L.

Déterminer les concentrations molaires des ions dans la solution finale obtenue.

6.3. On mélange 350 mL d'une solution de NaCl de concentration égale à 1,66 mol/L avec 150 mL d'une solution de NaCl de concentration égale à 0,89 mol/L.

Quelles sont les concentrations molaires des ions dans la solution finale obtenue ?

On donne :

- Masse molaire du chlore :  $M_{\text{Cl}} = 35,5 \text{ g/mol}$  ;
- Masse molaire du sodium :  $M_{\text{Na}} = 23 \text{ g/mol}$  ;
- Masse molaire du baryum :  $M_{\text{Ba}} = 137,3 \text{ g/mol}$  ;
- Masse molaire du cuivre :  $M_{\text{Cu}} = 63,5 \text{ g/mol}$  ;
- Masse molaire du soufre :  $M_{\text{S}} = 32 \text{ g/mol}$ .

**Activité 7 : Calcul des concentrations des espèces chimiques dans les solutions obtenues en additionnant ou en divisant d'autres solutions de même nature.**

7.1. Un chef de famille décide de partager une bouteille (1,25 L) de jus grenadine à ses trois enfants âgés respectivement de 5 ans, 8 ans et 10 ans. Chaque enfant dispose d'un verre de 0,5 L. Le verre de l'enfant de 5 ans est rempli au tiers de son volume, celui de l'enfant de 8 ans au trois-quarts de son volume et le verre de l'enfant de 10 ans est entièrement rempli. Sur la bouteille de jus on lit :

- sucre..... 94 g/L
- sel.....0,07 g/L
- énergie...377 kcal/L

7.1.1. Sachant que le sucre en question est principalement le glucose de formule  $\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6$ , déterminer la concentration massique du sucre dans chaque verre et conclure.

7.1.2. L'aîné consomme la moitié du jus contenu dans son verre et il vide complètement son reste dans le verre de jus de son cadet encore intact. Déterminer la nouvelle concentration massique du glucose dans le verre du cadet et conclure.

7.2. Sur une bouteille d'eau minérale remplie de marque Surpermont (1,5 L) ouverte et posée sur une table, on lit :

- calcium ( $\text{Ca}^{2+}$ ).....30 mg/L
- chlorure ( $\text{Cl}^-$ ).....1,3 mg/L
- potassium ( $\text{K}^+$ ).....3,8 mg/L
- pH.....7,1

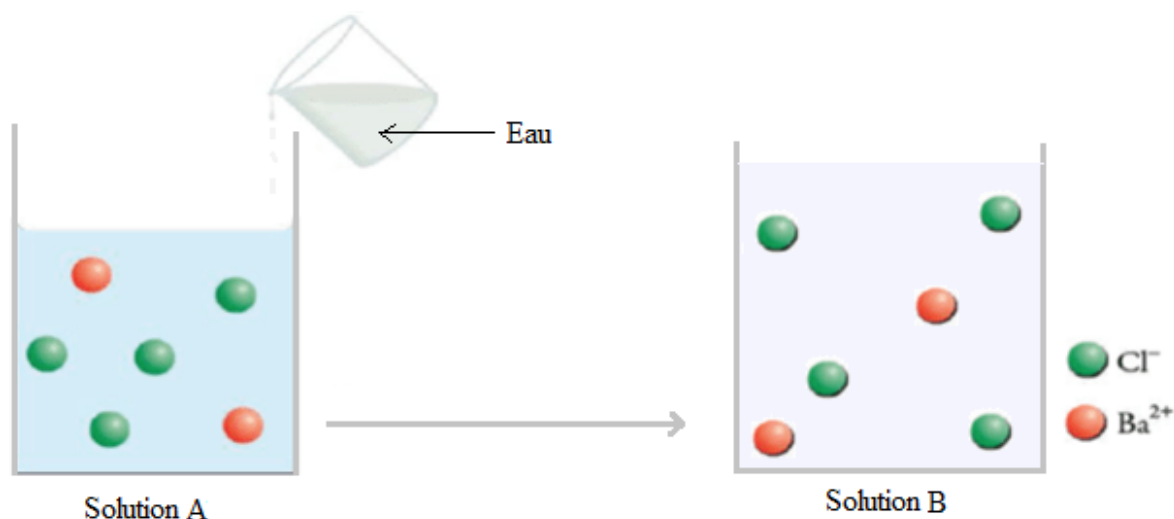
Par inadvertance, elle est renversée et s'est vidée de son contenu à moitié.

Déterminer en mg/L les concentrations des espèces ioniques dans l'eau qui reste dans bouteille.

On donne :  $M_{\text{Ca}} = 40,1 \text{ g/mol}$  et  $M_{\text{K}} = 39,1 \text{ g/mol}$ .

### Activité 8 : Calcul des concentrations des espèces chimiques dans une solution diluée

8.1. Une solution B est obtenue en ajoutant 200 mL d'eau dans 500 mL d'une solution aqueuse de chlorure de baryum (solution A) comme l'indique le schéma ci-dessous.



Calculer les concentrations (en mol/L) des ions  $\text{Ba}^{2+}$  et  $\text{Cl}^-$  dans les deux solutions A et B et conclure. Considérer que chaque sphère représente 0,10 mol de l'ion en solution.

8.2. On dissout dans l'eau une masse de 41,66 g de chlorure de baryum ( $\text{BaCl}_2$ ) et on obtient une solution de volume égal à 0,50 L. On ajoute dans cette solution un volume d'eau égal à 0,20 L.

Quelle sont les concentrations (en mol/L) des ions  $\text{Ba}^{2+}$  et  $\text{Cl}^-$  dans la solution finale obtenue ?

On donne :  $M_{\text{Cl}} = 35,5 \text{ g/mol}$  et  $M_{\text{Ba}} = 137,3 \text{ g/mol}$ .

### Annexe C : autres exemples des réponses fausses proposées par les participants aux différentes questions

#### ➤ Question Q2

2.1) Quelles sont les concentrations (en mol/L) des ions présents dans la solution finale obtenue.	a) $[Cl^-] = 1,42 \text{ mol/L}$ et $[Na^+] = 1,42 \text{ mol/L}$ <input checked="" type="radio"/> b) $[Cl^-] = 2,55 \text{ mol/L}$ et $[Na^+] = 2,55 \text{ mol/L}$ ✓ c) $[Cl^-] = 0,71 \text{ mol/L}$ et $[Na^+] = 0,71 \text{ mol/L}$ d) $[Cl^-] = 0,58 \text{ mol/L}$ et $[Na^+] = 0,13 \text{ mol/L}$ e) Autre réponse à préciser.....
2.2) Justifier votre réponse:	<p>pour chaque ion on trouve</p> $n_{Cl^-} = n_1 + n_2 = 2,55 \text{ mol/L}$ $n_{Na^+} = n_1 + n_2 = 2,55 \text{ mol/L}$ $Na^+ + Cl^- \leftrightarrow NaCl$ $n = 2,55 \text{ mol}$ $n_T = 0,5 \times 2,55 = 1,275$ $\overline{n_T} = 1,275 \text{ mol}$ $[Cl^-] = \frac{n}{V} = \frac{2,55}{0,5} = 5,1 \text{ mol/L}$
2.3) Confiance accordée à votre réponse:	<input checked="" type="radio"/> a) Sûre ✓ <input type="radio"/> b) Pas sûre

Q2) On mélange un volume  $V = 0,35 \text{ L}$  d'une solution de  $NaCl$  de concentration égale à  $1,66 \text{ mol/L}$  avec un volume  $V = 0,15 \text{ L}$  d'une solution de  $NaCl$  de concentration égale à  $0,89 \text{ mol/L}$ .

2.1) Quelles sont les concentrations (en mol/L) des ions présents dans la solution finale obtenue.	a) $[Cl^-] = 1,42 \text{ mol/L}$ et $[Na^+] = 1,42 \text{ mol/L}$ <input checked="" type="radio"/> b) $[Cl^-] = 2,55 \text{ mol/L}$ et $[Na^+] = 2,55 \text{ mol/L}$ c) $[Cl^-] = 0,71 \text{ mol/L}$ et $[Na^+] = 0,71 \text{ mol/L}$ d) $[Cl^-] = 0,58 \text{ mol/L}$ et $[Na^+] = 0,13 \text{ mol/L}$ e) Autre réponse à préciser.....
2.2) Justifier votre réponse:	<p>On mélange deux solutions de <math>NaCl</math> de concentrations <math>1,66 \text{ mol/L}</math> et <math>0,89 \text{ mol/L}</math>, on obtient les concentrations des ions présents dans la solution finale obtenue est égale à la somme des deux concentrations.</p> <p>Donc a:</p> $[Cl^-] = 1,66 + 0,89 = 2,55 \text{ mol/L}$ $[Na^+] = 1,66 + 0,89 = 2,55$ $[Cl^-] = 2,55 \text{ mol/L} \quad [Na^+] = 2,55 \text{ mol/L}$
2.3) Confiance accordée à votre réponse:	<input checked="" type="radio"/> a) Sûre X <input type="radio"/> b) Pas sûre



➤ Question Q3

3.1) Quelle est la concentration (en mol/L) de l'ion potassium ( $K^+$ ) dans cette solution sachant que la masse molaire de $K_2SO_4$ est $M_{K_2SO_4} = 174$ g/mol ?	<input checked="" type="radio"/> a) $[K^+] = 0,28$ mol/L <input type="radio"/> b) $[K^+] = 0,028$ mol/L <input type="radio"/> c) $[K^+] = 0,57$ mol/L <input type="radio"/> d) $[K^+] = 50$ mol/L <input type="radio"/> e) Autre réponse à préciser.....
3.2) Justifier votre réponse: $m_{(K_2SO_4)} = 5g ; V = 0,1L ; M_{(K_2SO_4)} = 174 g/mol$ d'après l'équation $SO_4^{2-} + 2H_3O^+ + K \xrightarrow{n_2} 2SO_2 + 6H_2O + K^+$ Calculons la concentration de l'ion potassium ( $K^+$ ) $n_1 = n_2 \Rightarrow \frac{m}{M} = \frac{V}{V_m} \text{ en } \frac{V}{V_m} = CV \Rightarrow \frac{m}{M} = CV$ $\Rightarrow MCV = m \Rightarrow C = \frac{m}{M \times V} = C = \frac{5}{174 \times 0,1} = 0,28 \text{ mol/L}$ d'où $[K^+] = 0,28 \text{ mol/L}$	
3.3) Confiance accordée à votre réponse	<input checked="" type="radio"/> a) Sûre <input type="radio"/> b) Pas sûre

➤ Question Q4

4.1) Quelle est la concentration (en mol/L) de l'ion sodium ( $Na^+$ ) dans la solution finale obtenue ? Considérez que chaque sphère (ion en solution) représente 0,10 mol.	<input type="radio"/> a) $[Na^+] = 0,80$ mol/L <input type="radio"/> b) $[Na^+] = 2$ mol/L <input type="radio"/> c) $[Na^+] = 1,6$ mol/L <input type="radio"/> d) $[Na^+] = 8$ mol/L <input checked="" type="radio"/> e) Autre réponse à préciser.....
4.2) Justifier votre réponse: - la concentration de la solution finale est de: $c = \frac{n}{V}$ alors $V = 0,4 + 0,1 = 0,5l$ AN: $c = \frac{0,1}{0,5}$ $c = 0,2 \text{ mol/L}$ - la concentration de l'ion $Na^+$ est de: $\frac{c_{NaCl}}{1} = \frac{c_{Na^+}}{1} \Leftrightarrow [NaCl] = [Na^+]$	
4.3) Confiance accordée à votre réponse	<input type="radio"/> a) Sûre <input checked="" type="radio"/> b) Pas sûre



➤ **Question Q5**

Q5) On mélange deux volumes égaux d'une même solution de chlorure de sodium NaCl de concentration égale à 0,10 mol/L.

5.1) Quelle est la concentration (en mol/L) de l'ion chlorure (Cl <sup>-</sup> ) dans la solution finale obtenue ?	a) [Cl <sup>-</sup> ] = 0,20 mol/L <input checked="" type="radio"/> b) [Cl <sup>-</sup> ] = 0,05 mol/L c) [Cl <sup>-</sup> ] = 0,30 mol/L d) [Cl <sup>-</sup> ] = 0,10 mol/L e) Autre réponse à préciser.....
5.2) Justifier votre réponse: $[NaCl] = 2 [Cl^-]$ $[Cl^-] = \frac{NaCl}{2}$ $AN: [Cl^-] = \frac{0,10}{2} = 0,05$ $d'où [Cl^-] = 0,05 \text{ mol/L}$	
5.3) Confiance accordée à votre réponse	<input checked="" type="radio"/> a) Sûre <input type="radio"/> b) Pas sûre

➤ **Question Q6**

Q6) Soient 5 solutions aqueuses identiques (même soluté et même solvant) de concentration en ion calcium (Ca<sup>2+</sup>) égale à 0,20 mol/L. On verse dans un même récipient les 5 solutions.

6.1) Quelle est la concentration (en mol/L) de l'ion Ca <sup>2+</sup> dans la solution finale obtenue ?	a) [Ca <sup>2+</sup> ] = 0,20 mol/L b) [Ca <sup>2+</sup> ] = 0,04 mol/L c) [Ca <sup>2+</sup> ] = 5 mol/L <input checked="" type="radio"/> d) [Ca <sup>2+</sup> ] = 1 mol/L e) Autre réponse à préciser.....
6.2) Justifier votre réponse: pour 5 solutions aqueuses de même soluté et solvant, on a: $5 [Ca^{2+}] = 5 \times 0,20$ donc la concentration finale est $\frac{= 1}{[Ca^{2+}] = 1 \text{ mol/L}}$	
6.3) Confiance accordée à votre réponse	<input checked="" type="radio"/> a) Sûre <input type="radio"/> b) Pas sûre

Q6) Soient 5 solutions aqueuses identiques (même soluté et même solvant) de concentration en ion calcium ( $\text{Ca}^{2+}$ ) égale à 0.20 mol/L. On verse dans un même récipient les 5 solutions.

6.1) Quelle est la concentration (en mol/L) de l'ion $\text{Ca}^{2+}$ dans la solution finale obtenue ?	a) $[\text{Ca}^{2+}] = 0,20 \text{ mol/L}$ <input checked="" type="radio"/> b) $[\text{Ca}^{2+}] = 0,04 \text{ mol/L}$ c) $[\text{Ca}^{2+}] = 5 \text{ mol/L}$ d) $[\text{Ca}^{2+}] = 1 \text{ mol/L}$ e) Autre réponse à préciser.....
6.2) Justifier votre réponse: Car chaque récipient contient un ion $\text{Ca}^{2+}$ égale à 0,20 mol/L de concentration pour cela on doit diviser par 5 pour trouver la solution finale obtenue par chaque récipient qui est de: $[\text{Ca}^{2+}] = \frac{0,20}{5} = 0,04 \text{ mol/L}$	
6.3) Confiance accordée à votre réponse	a) Sûre <input checked="" type="checkbox"/> b) Pas sûre

## Annexe D : procédure du test Z de façon manuelle

On utilise ce test pour comparer deux moyennes observées sur deux échantillons A et B indépendants à grand nombre ( $n_A$  et  $n_B \geq 30$ ) dans le but de valider ou de rejeter une hypothèse de recherche. Dans ce cas, Z est la variable qui mesure l'écart réduit entre les moyennes de deux groupes et suit la loi normale de distribution centrée réduite N (0,1). Dans la pratique, la variable Z est donnée par la formule suivante :

$$Z = \frac{m_A - m_B}{\sqrt{\frac{S_A^2}{n_A} + \frac{S_B^2}{n_B}}}$$

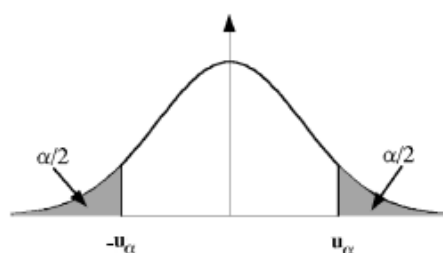
avec  $m_A$  et  $m_B$  qui sont respectivement les moyennes du groupe A et groupe B,  $S_A$  et  $S_B$  qui sont respectivement les écart-types des moyennes A et moyenne B enfin,  $n_A$  est la taille de l'échantillon ou groupe A et  $n_B$  celle du groupe B.

Pour interpréter le résultat du test, on calcule Z et puis on la compare à 1,96 :

- Si  $|Z| < 1,96$  alors, la différence n'est pas significative à 5 % et l'hypothèse est rejetée ;
- $|Z| \geq 1,96$  la différence est significative à 5 % et l'hypothèse est validée ;
- Enfin, le degré de signification ou la probabilité (P ou  $\alpha$ ) est lu dans la table de l'écart réduit ci-dessous en fonction de la valeur de Z trouvée.

**Tableau 18**

*Table de l'écart réduit centré de la loi normale centrée réduite*



$\alpha$	0,001	0,000 1	0,000 01	0,000 001	0,000 000 1	0,000 000 01	0,000 000 001
$u_{\alpha}$	3,29053	3,89059	4,41717	4,89164	5,32672	5,73073	6,10941