

Mémoire, Partim A, COLLÉGIALITÉ

Auteur : Gouders, Chloé

Promoteur(s) : Leyh, Bernard

Faculté : Faculté des Sciences

Diplôme : Master en sciences chimiques, à finalité didactique

Année académique : 2024-2025

URI/URL : <http://hdl.handle.net/2268.2/22367>

Avertissement à l'attention des usagers :

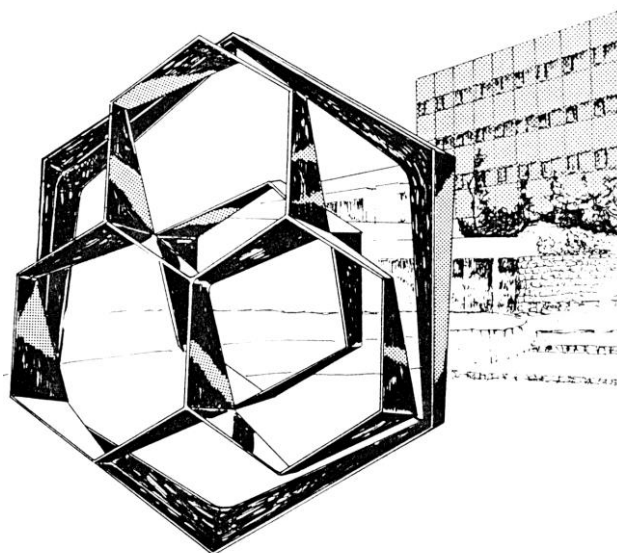
Tous les documents placés en accès ouvert sur le site le site MatheO sont protégés par le droit d'auteur. Conformément aux principes énoncés par la "Budapest Open Access Initiative"(BOAI, 2002), l'utilisateur du site peut lire, télécharger, copier, transmettre, imprimer, chercher ou faire un lien vers le texte intégral de ces documents, les disséquer pour les indexer, s'en servir de données pour un logiciel, ou s'en servir à toute autre fin légale (ou prévue par la réglementation relative au droit d'auteur). Toute utilisation du document à des fins commerciales est strictement interdite.

Par ailleurs, l'utilisateur s'engage à respecter les droits moraux de l'auteur, principalement le droit à l'intégrité de l'oeuvre et le droit de paternité et ce dans toute utilisation que l'utilisateur entreprend. Ainsi, à titre d'exemple, lorsqu'il reproduira un document par extrait ou dans son intégralité, l'utilisateur citera de manière complète les sources telles que mentionnées ci-dessus. Toute utilisation non explicitement autorisée ci-avant (telle que par exemple, la modification du document ou son résumé) nécessite l'autorisation préalable et expresse des auteurs ou de leurs ayants droit.

FACULTE DES SCIENCES
Département de Chimie

Didactique de la Chimie – Bernard Leyh

**Comment les manuels et traités d'enseignement
mobilisent-ils les trois niveaux de représentation du
triangle de Johnstone ?**



Année académique 2024-2025

Dissertation présentée par
Chloé GOUDERS
en vue de l'obtention du diplôme de
Master en Sciences Chimiques

Remerciements

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude envers toutes les personnes qui m'ont accompagnée et soutenue tout au long de la réalisation de ce mémoire. Ce travail n'aurait pas été possible sans leur aide précieuse et leur soutien indéfectible.

Tout d'abord, je remercie sincèrement Monsieur Bernard Leyh, professeur à l'Université de Liège et promoteur de ce mémoire, pour son encadrement bienveillant, ses conseils avisés et son expertise, qui ont grandement contribué à la qualité de ce travail.

Je souhaite également remercier Monsieur Vincent Natalis, docteur du service de didactique de la chimie, pour m'avoir aidé à réaliser les analyses statistiques des ouvrages scolaires et pour ses précieux conseils.

Je suis infiniment reconnaissante envers ma famille et mes amis pour leur soutien constant, leur patience et leurs encouragements, qui m'ont permis de rester motivée même dans les moments les plus difficiles.

À toutes et à tous, je vous adresse mes plus sincères remerciements.

Table des matières

Introduction	6
Chapitre 1 : Etat de l'art	7
1.1) Les différentes sources de difficultés	7
1.1.1) La nature de la chimie et ses concepts scientifiques	8
1.1.2) Le langage scientifique.....	8
1.1.3) Préconceptions des étudiants avant l'enseignement et leur résistance au changement.....	8
1.1.4) La pensée multi-niveau	9
1.2) Le triangle de Johnstone.....	9
1.3) Apports des neurosciences à l'éducation	12
1.4) Méthodes didactiques.....	13
1.5) Contexte de l'analyse des manuels.....	17
Chapitre 2 : Matériels et méthodes.....	18
2.1) Mise en place des critères d'analyse	18
2.2) Calibrage	23
2.3) Calcul du Kappa de Cohen.....	23
2.3.1) Construction de la matrice	23
2.3.2) Calcul du coefficient Kappa de Cohen.....	24
2.3.3) Interprétation du coefficient Kappa de Cohen	26
Chapitre 3 : Les manuels de chimie de l'enseignement secondaire.....	27
3.1) Choix des manuels	27
3.2) Résultats descriptifs de l'analyse des manuels belges	28
3.2.1) Objectifs des figures.....	28
3.2.2) Connexion macroscopique-submicroscopique-symbolique.....	30
3.2.3) Qualité des figures.....	33
3.3) Résultats descriptifs de l'analyse des manuels français	37
3.3.1) Objectifs des figures.....	37
3.3.2) Connexion macroscopique-submicroscopique-symbolique.....	39
3.3.3) Qualité des figures.....	41

3.4)	Discussion et interprétation des résultats	46
Chapitre 4 :	Les ouvrages de chimie de l'enseignement supérieur	48
4.1)	Choix des manuels	48
4.2)	Résultats descriptifs de l'analyse	48
4.2.1)	Objectifs des figures.....	49
4.2.2)	Connexion macroscopique-submicroscopique-symbolique.....	50
4.2.3)	Qualité des figures.....	53
4.3)	Discussion et interprétation des résultats	59
Chapitre 5 :	Conclusion et perspectives	61
Références	65

Introduction

Lors de l'enseignement et de l'apprentissage de la chimie, les étudiants sont confrontés constamment, et parfois simultanément, à trois niveaux de représentation : le niveau macroscopique (observable, perceptible à notre échelle), le niveau submicroscopique (à l'échelle des atomes, molécules, ions) et le niveau symbolique (formules et équations chimiques ou mathématiques). Ces trois niveaux sont souvent représentés sous la forme d'un triangle appelé triangle de Johnstone ou triplet de la chimie, où chaque sommet correspond à un niveau de représentation (Sanchez, 2018 ; Taber, 2013 ; Xu, 2021). Les scientifiques et les professeurs de sciences passent rapidement d'un niveau à l'autre lors de l'analyse d'un problème chimique, ou de son explication, mais les étudiants débutants éprouvent de nombreuses difficultés à maîtriser et mobiliser ces différents niveaux de représentation (Xu, 2021). Nous savons que les manuels scolaires sont des outils pédagogiques majeurs mis à la disposition de tous les élèves et ont donc une part importante dans l'apprentissage des élèves (Gkitzia et al., 2011). C'est pourquoi ce travail de fin d'études va consister à analyser les ouvrages destinés à l'enseignement secondaire et au 1^{er} cycle universitaire, afin de déterminer comment ceux-ci utilisent les trois niveaux de représentation du triangle de Johnstone dans l'apprentissage des élèves.

Ce travail est divisé en deux parties. La première partie est consacrée à l'état de l'art et comprend une analyse des articles de la littérature. Ce premier chapitre comprend plusieurs sections. Une première section analyse les différentes sources potentielles de difficultés chez les étudiants lors de l'apprentissage de la chimie. Une deuxième section comprend une explication approfondie du triangle de Johnstone et des trois niveaux de représentation ainsi qu'un ensemble de travaux réalisés pour réinterpréter ce triangle. Une troisième section propose une liste des apports des neurosciences à propos des processus impliqués dans le cerveau des étudiants soumis à un apprentissage de la chimie. La quatrième section comprend un ensemble de méthodes didactiques trouvées dans la littérature et mises en place pour améliorer l'apprentissage de la chimie notamment sur la maîtrise des différents niveaux de représentation. La deuxième partie est consacrée à une analyse critique approfondie des ouvrages d'enseignement de la chimie utilisés dans l'enseignement secondaire supérieur et le premier cycle universitaire du point de vue des différents niveaux de représentation, essentiellement du point de vue iconographique. Cette seconde partie comprend plusieurs chapitres. Le chapitre 2 est consacré à l'explication de la méthode utilisée lors de cette analyse. Le chapitre 3 présente les résultats descriptifs sur les manuels de l'enseignement secondaire ainsi que leur interprétation. Le chapitre 4 suit un plan similaire pour les ouvrages destinés au 1^{er} cycle de l'enseignement supérieur. Les conclusions et perspectives sont présentées dans le chapitre 5.

Chapitre 1 :

Etat de l'art

1.1) Les différentes sources de difficultés

Depuis de nombreuses années, les sciences sont considérées par beaucoup d'étudiants comme une des matières les plus difficiles à apprendre à l'école (Gulacar et al., 2020). Cette problématique n'est pas nouvelle et fait l'objet de recherches depuis plusieurs décennies. En effet, de nombreuses recherches ont montré que les étudiants depuis leur plus jeune âge jusqu'au niveau universitaire éprouvent de grandes difficultés à étudier et comprendre les sciences (Xu, 2021). On constate, un peu partout dans le monde, un succès limité dans l'enseignement des sciences. L'enquête PISA, qui est une étude internationale visant à évaluer les compétences des élèves âgés de 15 ans notamment dans le domaine scientifique, a montré une baisse généralisée des performances des élèves de 15 ans en sciences à travers le monde. En 2022, selon les résultats de l'enquête PISA, pour la Fédération Wallonie-Bruxelles (FWB), **26.9%** des élèves étaient considérés comme étant en difficulté en sciences. Cela signifie qu'environ un quart des élèves de 15 ans en FWB rencontrent des difficultés dans ce domaine, ce qui représente une augmentation par rapport à l'édition de 2018 où cette proportion était de **20.9%** (OCDE 2022). Ce faible taux de réussite se reflète notamment par un manque d'intérêt des étudiants pour les sciences et par une attitude assez peu scientifique à l'égard des phénomènes naturels. Selon Johnstone, cela n'a pas toujours été le cas (Johnstone, 1991). Le raisonnement de l'article qui a mis en lumière son approche fondée sur le triplet de la chimie est le suivant. Avant les progrès scientifiques modernes, les sciences étaient enseignées d'une façon différente de celle d'aujourd'hui, tous les concepts étaient définis et séparés en sections distinctes. En effet, au lieu d'enseigner les sciences de manière interconnectée comme c'est souvent le cas aujourd'hui, chaque concept scientifique était considéré indépendamment. Par exemple, la physique, la chimie et la biologie étaient étudiées comme des domaines totalement séparés sans beaucoup de liens entre eux. Cependant, dans les années 1960, une grande révolution a eu lieu dans l'enseignement des sciences. De nouveaux livres et programmes d'enseignement ont fait leur apparition et ont proposé des innovations dans la façon d'enseigner la chimie. Ces programmes proposaient d'enseigner les sciences avec une vision plus experte en considérant les grands modèles universels et en réalisant des liens entre tous les concepts. Ces changements ont mené à de nombreuses confusions et difficultés dans l'apprentissage et l'enseignement des sciences chez les étudiants notamment dans celui de la chimie. Dans ce mémoire, nous nous concentrerons plus particulièrement sur l'apprentissage de la chimie. Mais quelles sont les différentes raisons qui rendent l'apprentissage de la chimie si difficile pour les étudiants ? Pour répondre à cette question, nous allons examiner quatre grandes sources potentielles de difficultés.

1.1.1) La nature de la chimie et ses concepts scientifiques

La première source potentielle de difficultés chez les étudiants provient de la nature de la chimie elle-même et des différents concepts scientifiques qui s’y rapportent. L’apprentissage de la chimie nécessite l’utilisation de compétences de pensée abstraite (Johnstone, 1991 ; Schmidt, 2021). Les étudiants doivent comprendre de nombreux concepts scientifiques tels que les molécules, les atomes ou les électrons, qui ne sont pas perceptibles par leurs sens. En effet, les étudiants n’ont pas de moyen sensoriel direct pour accéder à ces objets et il est parfois difficile pour eux d’accepter des faits qui ne sont qu’indirectement observables ou qui ont lieu à des dimensions plus petites que ce que nous pouvons voir (Johnstone, 1991 ; Schmidt, 2021). Etant donné que ces concepts scientifiques de base ne sont pas toujours compris et maîtrisés, les étudiants risquent de ne pas comprendre des sujets plus avancés et d’éprouver des difficultés dans la compréhension de la chimie en général (Gulacar et al., 2020 ; Johnstone, 1991 ; Schmidt, 2021).

1.1.2) Le langage scientifique

La seconde source potentielle de difficultés provient de la difficulté intrinsèque du langage scientifique (Johnstone, 1991 ; Rees et al., 2021 ; Taber, 2015). L’apprentissage des sciences exige que les étudiants développent des compétences linguistiques afin de pouvoir comprendre le discours d’un enseignant à propos d’une matière donnée et participer au langage social de la science en utilisant un vocabulaire spécifique, parfois jargonant (Rees et al., 2021). En effet, les sciences en général font un appel massif à des mots techniques peu familiers pour les étudiants, ce qui complique leur compréhension (Johnstone, 1991). Ce vocabulaire présente de nombreux défis, tels que des mots qui ont des significations différentes en science et dans la vie quotidienne ou qui ont des significations multiples. Le langage chimique correspond à l’apprentissage d’une nouvelle langue nécessaire pour comprendre la chimie, ce qui cause de nombreuses difficultés chez les étudiants (Rees et al., 2021).

1.1.3) Préconceptions des étudiants avant l’enseignement et leur résistance au changement

La troisième source potentielle de difficultés provient des connaissances et des conceptions alternatives que les étudiants possèdent avant un enseignement donné (Gulacar et al., 2020 ; Taber, 2001). En effet, tous les étudiants arrivent en classe avec diverses idées à propos du monde qui ne sont pas compatibles avec les connaissances scientifiques enseignées à l’école, elles sont souvent désignées par le terme « conceptions alternatives » (Taber, 2001). Par exemple, les élèves pensent souvent qu’une balle légère flotte tandis qu’une balle lourde coule parce qu’ils ne considèrent que le facteur poids au lieu de considérer à la fois le poids et le volume (Taber, 2001). Cela pose des problèmes dans l’apprentissage des sciences puisque la plupart de ces conceptions alternatives persistent même chez les étudiants ayant reçu une instruction des concepts scientifiques. Elles sont donc difficiles à supprimer (Taber, 2001).

1.1.4) La pensée multi-niveau

La dernière source potentielle de difficultés, qui est le sujet principal de ce mémoire, correspond à la pensée multi-niveau, plus particulièrement décrite par le modèle du triangle de Johnstone (Johnstone, 1991 ; Schmidt, 2020 ; Taber, 2013). Ce point sera expliqué plus en détail dans la section 1.2 de ce mémoire.

1.2) Le triangle de Johnstone

Au début des années 1980, Alex H. Johnstone a conçu un modèle dans le but de rendre la chimie plus accessible aux étudiants débutants (Taber, 2013). Selon lui, l'enseignement de la chimie s'appuie sur l'idée selon laquelle il existe trois niveaux de représentation autour desquels l'apprentissage et l'enseignement de la chimie s'articulent : les domaines macroscopique, submicroscopique et symbolique (Taber, 2013 ; Xu, 2021). Johnstone fut l'un des premiers à évoquer les difficultés que peuvent avoir les élèves à suivre la gymnastique de points de vue que les enseignants de chimie emploient dans leurs explications, lorsqu'ils circulent entre le macroscopique, le submicroscopique et le symbolique (Johnstone, 1991). Ce modèle appelé le triplet de la chimie ou encore triangle de Johnstone décrit ces trois niveaux sous la forme d'un triangle avec les sommets étiquetés comme macroscopique, submicroscopique et symbolique (Sanchez, 2019 ; Schmidt, 2021 ; Taber, 2013 ; Xu, 2021). (Figure 1)

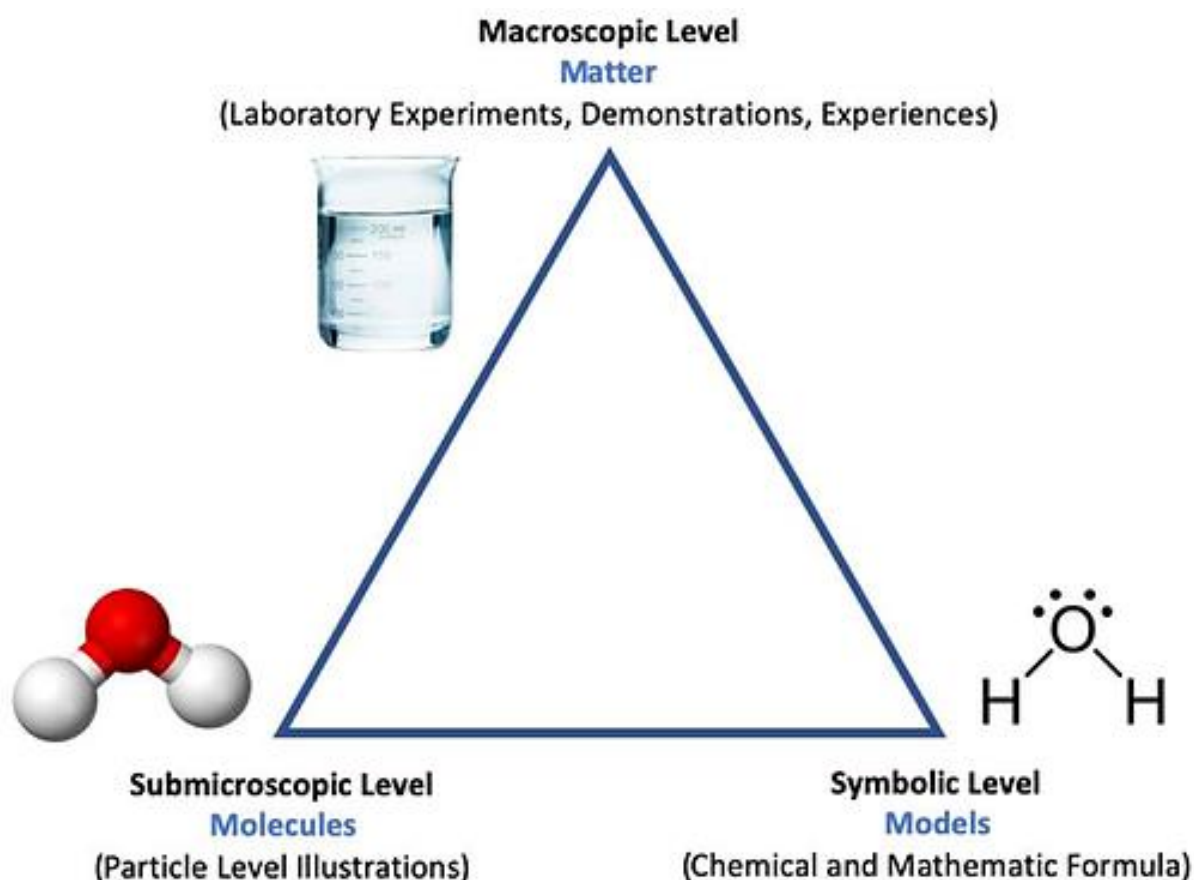


Figure 1 : Triangle de Johnstone (Schmidt, 2021).

Johnstone définit le niveau macroscopique comme correspondant au niveau observable, c'est-à-dire à ce que nous pouvons observer et manipuler pour décrire les propriétés de la matière (la couleur, la densité, l'odeur) (Sanchez, 2018 ; Schmidt, 2021 ; Taber, 2013) ; le niveau submicroscopique correspond au niveau des particules c'est-à-dire ce qui ne peut être conceptualisé qu'à partir d'expériences indirectes, faisant appel à des appareillages complexes (spectroscopie, microscopie à effet tunnel...), à une échelle infime comme les électrons, les atomes, les ions... (Sanchez, 2018 ; Schmidt, 2021 ; Taber, 2013) ; le niveau symbolique correspond au langage qui décrit les phénomènes chimiques sous forme de symboles chimiques, de formules et d'équations (Sanchez, 2018 ; Schmidt, 2021 ; Taber, 2013). La compréhension de ces trois niveaux et le passage de l'un à l'autre est indispensable pour une bonne compréhension de la chimie. Cette capacité à passer d'un niveau à l'autre est appelée la compétence translationnelle (Sanchez, 2018). Cependant, les étudiants éprouvent des difficultés dans la compréhension de ces trois niveaux mais également dans la capacité à passer de l'un à l'autre (Johnstone, 1991). En effet, les enseignants sautent souvent rapidement d'un niveau à l'autre et parfois n'expliquent pas les phénomènes à tous les niveaux (Johnstone, 1991). La plupart des enseignants n'abordent pas de manière explicite l'enseignement des connaissances chimiques en distinguant les domaines macroscopique, submicroscopique et symbolique ainsi que les relations entre eux (Jaber et al., 2012). Si l'enseignant ne met pas en évidence la relation entre ces trois niveaux, l'étudiant pourrait avoir une compréhension fragmentée et superficielle, ne sachant pas expliquer le phénomène chimique de manière globale, en reliant l'observation, les processus moléculaires et l'équation chimique. Il est donc nécessaire de mettre en place des pratiques d'enseignement qui permettront aux élèves de développer leur capacité à reconnaître ces trois niveaux et à réaliser des liens entre ceux-ci.

Au cours des 30 dernières années, le modèle du triangle de Johnstone a été très influent dans le domaine de l'enseignement de la chimie autant dans la rédaction de nouveaux programmes que dans la recherche didactique pour rationaliser les performances parfois insuffisantes des étudiants. De nouvelles interprétations et changements dans ce triplet de la chimie ont été proposés (Taber, 2013 ; Xu, 2021).

En 2006, Mahaffy a modifié le triangle de Johnstone en ajoutant un nouveau niveau à savoir l'élément humain (Figure 2). Ce nouveau niveau permettrait de connecter la chimie avec le monde réel ainsi que l'expérience de l'élève (Xu, 2021).

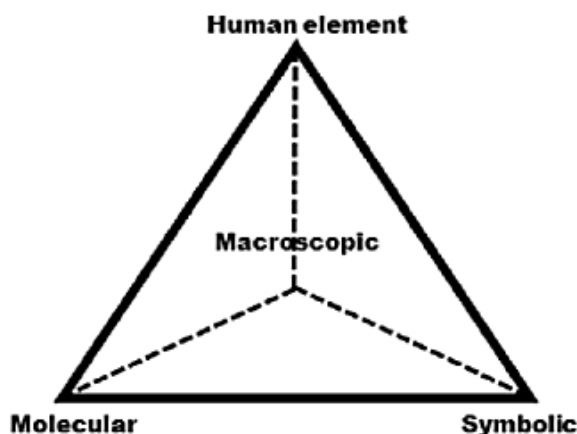


Figure 2 : Triangle de Mahaffy adapté du triangle de Johnstone.

En 2013, Taber a réinterprété le niveau symbolique du triangle de Johnstone qui semblait selon lui ambigu. Selon Taber, les représentations symboliques sont essentielles pour représenter et communiquer efficacement dans l'apprentissage de la chimie. Dans la vision de Taber, le niveau symbolique ne doit cependant pas être considéré comme un niveau à part entière de représentation en chimie et sa place dans le triangle doit être modifiée. Il a donc mis en place un modèle revisité du triangle de Johnstone en scindant le niveau de l'expérience directe (1^{er} sommet du triangle) et celui de l'interprétation qui peut faire référence aux deux domaines macroscopique (niveau théorique-descriptif, 2^e sommet) et submicroscopique (niveau théorique-explicatif, 3^e sommet). Il considère alors les représentations symboliques comme un pont permettant de relier les domaines interprétatifs macroscopique et submicroscopique en chimie, proposant ainsi une approche utile pour comprendre l'enseignement et l'apprentissage de la chimie en classe (Taber, 2013 ; Xu, 2021). Ce principe est bien illustré dans la figure suivante, qui met en avant la manière dont les concepts macroscopiques, submicroscopiques et les représentations symboliques interagissent (Figure 3). Par exemple, au niveau de l'expérience directe, on peut observer des phénomènes visibles tels que des substances chimiques sous différents états d'agrégation, montrant différentes couleurs..., ou des réactions observables, comme la combustion d'un gaz ou la dissolution d'un solide. Ces observations peuvent être interprétées en faisant appel à des concepts macroscopiques (chaleur dégagée lors d'une combustion, volume de gaz dégagé, concentration résultant d'une dissolution, etc.) et elles trouvent également leur explication au niveau submicroscopique, où les interactions entre particules (molécules, ions, atomes) sont modélisées. Enfin, les représentations symboliques telles que des formules chimiques comme H_2O ou des équations comme $\text{CH}_4(\text{g}) + 2 \text{O}_2(\text{g}) \rightarrow 2 \text{H}_2\text{O}(\text{g}) + \text{CO}_2(\text{g})$ servent de pont pour connecter ces deux niveaux. Elles permettent non seulement de décrire les substances et les réactions observées (niveau macroscopique) mais également de modéliser les mécanismes invisibles sous-jacents (niveau submicroscopique). En reprenant l'exemple de la combustion du méthane, on peut analyser ce processus selon trois dimensions.

- Le niveau de l'expérience directe : on observe une flamme, de la chaleur, et peut-être de la condensation (eau) ou des gaz dégagés.
- Le niveau de l'analyse macroscopique : mesure de la quantité de chaleur dégagée ou du volume de dioxyde de carbone produit.
- Le niveau de l'interprétation submicroscopique : ce phénomène correspond à une interaction entre les molécules de méthane (CH_4) et de dioxygène (O_2), conduisant à la formation de dioxyde de carbone (CO_2) et d'eau (H_2O). La représentation symbolique : par l'équation chimique $\text{CH}_4(\text{g}) + 2 \text{O}_2(\text{g}) \rightarrow 2 \text{H}_2\text{O}(\text{g}) + \text{CO}_2(\text{g})$ sert de médiation, permettant de traduire les phénomènes visibles en un modèle explicatif des interactions entre particules. (Figure 3)

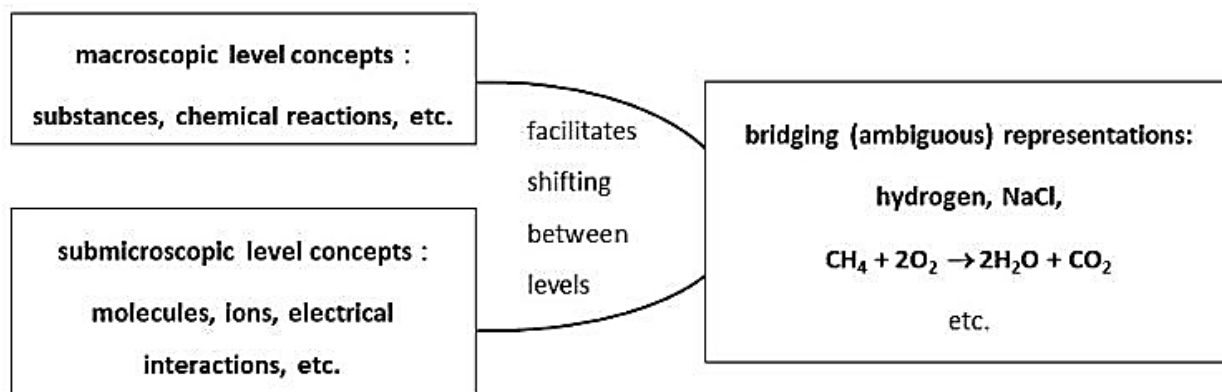


Figure 3 : Modèle de Taber adapté du triangle de Johnstone (Taber, 2013).

1.3) Apports des neurosciences à l'éducation

Lors de l'apprentissage des sciences, un grand nombre de zones cérébrales et de réseaux sont activés dans notre cerveau mettant en évidence la complexité de cet apprentissage. Les zones cérébrales désignent les différentes régions du cerveau qui sont anatomiquement et fonctionnellement spécialisées. Chaque zone est responsable de tâches spécifiques, telles que la perception sensorielle, la motricité, le langage, la mémoire, les émotions ou les fonctions cognitives supérieures. Un nombre important de recherches en neurosciences ont été effectuées ces dernières années et ont permis de fournir des éléments à propos du fonctionnement de la connaissance, de la pensée et de l'apprentissage dans notre cerveau via des mesures de l'activité neuronale (Seethaler et al., 2018 ; Vaughn et al., 2020).

Vaughn et al. (2020) ont montré, à l'aide de l'imagerie par résonance magnétique fonctionnelle (IRMf), que lorsqu'une personne évalue une théorie scientifique plausible, une activité cérébrale est observée dans certaines zones cérébrales. Une activité cérébrale est observée dans le gyrus frontal supérieur droit et inférieur gauche qui jouent un rôle dans les fonctions exécutives, comme l'attention et la prise de décision. Une activité cérébrale est également observée dans des parties du cortex visuel primaire qui traitent les informations visuelles. De plus, lorsque l'on présente aux participants des données compatibles avec la théorie scientifique proposée, on observe une activation dans le gyrus caudé et parahippocampique qui sont les régions liées à l'apprentissage et à la mémoire. Enfin, lorsque l'on présente aux participants de l'étude des données incompatibles avec la théorie scientifique proposée, on observe une activation du cortex préfrontal dorsolatéral gauche (DL-PFC) et des régions dorsales du cortex cingulaire antérieur (ACC) qui correspondent aux régions associées à la détection des erreurs, à la surveillance des conflits et à l'inhibition (Vaughn et al., 2020). Vaughn et al. (2020) ont également découvert que lorsque des experts scientifiques observaient des données incorrectes (c'est-à-dire des informations, observations ou résultats expérimentaux qui contredisent une théorie, une hypothèse ou un modèle scientifique établi, ou qui sont en désaccord avec la réalité ou les connaissances validées), une augmentation de l'activité du cortex cingulaire antérieur (ACC) associé à la détection d'erreurs était déclenchée. Cela a permis de déterminer que les experts en sciences ont subi une inhibition de leurs préconceptions au cours de leur étude, changement qui peut être observé dans leurs activités cérébrales, comparé aux zones activées chez les novices, qui n'ont subi aucun changement (Seethaler et al., 2018 ; Vaughn et al., 2020).

Les experts scientifiques présentaient également une activité supérieure par rapport aux novices dans les régions du DL-PFC gauche, le PFC antérieur et le VL-PFC (cortex préfrontal ventrolatéral) droit c'est-à-dire les zones liées à l'inhibition. Cela a permis de conclure que les experts n'ont pas éradiqué totalement leurs préconceptions car ceux-ci activent des zones liées à l'inhibition lorsqu'ils évaluent des données incorrectes. Ces préconceptions sont toujours conservées dans leurs mémoires mais elles sont inhibées temporairement pour permettre de fournir une réponse correcte (Vaughn et al., 2020).

Ces préconceptions peuvent être particulièrement problématiques lorsqu'elles sont liées à une mauvaise utilisation ou compréhension du triangle de Johnstone. Pour donner un exemple classique, la préconception selon laquelle un objet plus lourd tombe plus vite qu'un objet plus léger peut, elle aussi, être liée à une mauvaise compréhension du triangle de Johnstone. Cette idée provient souvent d'une observation macroscopique mal interprétée : les élèves peuvent voir des objets macroscopiques de masses différentes tomber à des vitesses différentes à cause de la résistance de l'air. Ils confondent alors la représentation macroscopique (ce qui est observable à l'œil nu) avec la conceptualisation scientifique qui distingue la force de pesanteur des forces de frottement. En réalité, dans le vide, tous les objets sont soumis à la même accélération, indépendamment de leur masse, en raison de l'accélération gravitationnelle qui agit de manière égale sur toutes les masses. Une vision submicroscopique permet de corriger la préconception : un objet macroscopique est un assemblage de particules submicroscopiques qui sont toutes soumises à la même accélération qui sera aussi celle de leur assemblage macroscopique, quel que soit le nombre de particules le constituant, et donc quelle que soit sa masse. On constate ainsi qu'une bonne articulation des niveaux macroscopique et submicroscopique peut permettre, même dans un problème qui sort quelque peu du cadre strict de la chimie et qui est plutôt une question de physique élémentaire, de corriger une conception alternative courante.

Toutes ces études ont permis de déterminer les zones cérébrales activées lors de l'apprentissage des sciences. On observe une activation spécifique dans le cortex préfrontal dorsolatéral gauche (DL-PFC), le cortex préfrontal ventrolatéral droit (VL-PFC), le cortex cingulaire antérieur (ACC), le lobe pariétal supérieur et le cortex visuel. Ces zones sont liées à des tâches liées à l'apprentissage des sciences attribuées à la mémoire de travail, la fonction exécutive, la détection des erreurs, le contrôle des conflits, l'inhibition, la relocalisation des ressources attentionnelles, au traitement visio-spatial et à l'attention visuelle (Vaughn et al., 2020).

1.4) Méthodes didactiques

Il existe aujourd'hui de nombreuses recherches en didactique des sciences qui ont permis de développer des approches pédagogiques pour l'enseignement de la chimie en faisant référence au triangle de Johnstone. Plusieurs solutions pédagogiques ont été proposées dans la littérature dans le but d'améliorer la compréhension des trois niveaux de représentation et le passage de l'un à l'autre.

Tout d'abord, une nouvelle méthode pédagogique intéressante pour permettre l'amélioration de l'apprentissage de la science et des performances des étudiants est appelée classe inversée. Cette méthode consiste en un visionnage d'une vidéo pédagogique avant la venue au cours de l'élève. Ces vidéos sont des enregistrements de l'enseignant qui contiennent des modes de présentation

des différents niveaux du triangle de Johnstone : des animations moléculaires pour le niveau submicroscopique, des démonstrations expérimentales en laboratoire pour le niveau macroscopique et des captures d'écrans commentées pour le niveau symbolique (Figure 4), le format vidéo se prêtant mieux au jeu réfléchi du changements de points de vue aux moments clés d'explications multi-niveaux. Cette méthode d'apprentissage permet aux étudiants d'apprendre le contenu du cours à la maison et permet à la salle de classe de devenir un environnement d'apprentissage actif où les étudiants appliquent les concepts. Grâce à cette méthode, les étudiants sont confrontés aux trois niveaux de représentation pour chaque phénomène chimique et acquièrent la capacité de voyager d'un niveau à l'autre avec moins de difficultés (Petillion et al., 2020).



Figure 4 : Exemples de captures d'écran de chacun des trois segments vidéo, chacun représentant un coin du triangle de Johnstone (Petillion et al., 2020).

Une autre méthode didactique qui pourrait être mise en place dans les écoles afin d'améliorer la compréhension des étudiants sur les différents niveaux macroscopique, submicroscopique et symbolique de la chimie serait la mise en place d'une plateforme qui offre des leçons de réalité virtuelle qui permettent aux étudiants d'interagir avec des molécules en temps réel et d'observer les atomes et leur structure (Figure 5). Ces leçons de réalité virtuelle sont des cours de 3 à 7 minutes qui peuvent être intégrés dans une séquence classique pour qu'elle soit plus visuelle et complète. Chacune de ces leçons commence dans un laboratoire et chaque élève peut zoomer sur le niveau moléculaire des solutions présentes dans le laboratoire et peut observer les noyaux atomiques ainsi que les protons et les électrons présents dans les atomes qui composent ces solutions. Les élèves peuvent interagir avec les atomes virtuels (explorer, pivoter, voler à travers le cristal et former n'importe quel atome). Cette nouvelle méthode didactique permettrait aux étudiants de passer d'un niveau de représentation à l'autre et d'améliorer leurs compétences translationnelles (Maksimenko et al., 2021).

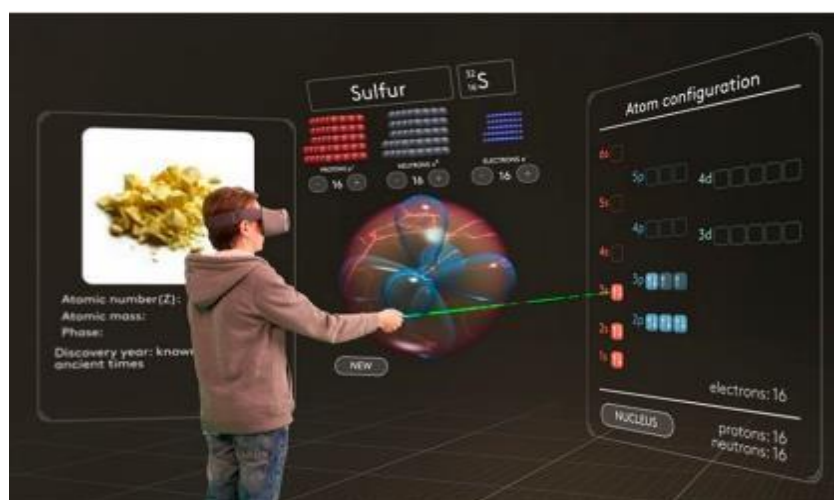


Figure 5 : Leçons de réalité virtuelle (Maksimenko et al., 2021).

Il a également été proposé dans la littérature de mettre en place des démonstrations ainsi que des activités en laboratoire qui donnent aux étudiants l'occasion d'expérimenter la chimie au niveau macroscopique pour qu'ils puissent établir un lien plus significatif avec le niveau submicroscopique et symbolique (Bruck et al., 2010 ; Schmidt, 2021)). Les groupes d'étudiants sont d'abord invités à suivre des mini-conférences contenant des présentations et des démonstrations sur le sujet abordé lors du laboratoire. Les étudiants réalisent ensuite des laboratoires et des activités conçues dans le but de lier chaque concept à tous les niveaux de représentation. Ce type de laboratoire axé sur les trois niveaux de représentation permettrait également d'améliorer la capacité des élèves à faire des liens entre les niveaux macroscopique, submicroscopique et symbolique (Bruck et al., 2010).

La mise en place de phases de discussions et de raisonnements en classe par l'enseignant pourrait également permettre aux étudiants de coordonner plus facilement les différents niveaux macroscopique, submicroscopique et symbolique. Ces discussions seraient réalisées en petits groupes et chaque étudiant serait amené à poser des questions et à interagir avec le professeur. Les étudiants prennent un rôle actif dans leur propre apprentissage. Au lieu de recevoir des informations passivement, ils explorent des concepts par la résolution de problèmes, la discussion et l'investigation. Les étudiants sont guidés par des séries de questions qui les poussent à réfléchir, à analyser et à découvrir les principes scientifiques par eux-mêmes, plutôt que d'être simplement confrontés à des faits ou à des formules. Les questions sont structurées de manière à aider les étudiants à progresser logiquement dans leur compréhension. Les interactions avec les enseignants permettraient aux élèves de réaliser des tâches trop complexes pour qu'ils les accomplissent seuls et qui se situent légèrement en dehors de la zone de développement proximal de Vygotski (1985), en faisant appel à l'étayage de Brunner (1983). L'étayage sera aussi mobilisé dans la prochaine proposition pédagogique. En ce qui concerne le triangle de Johnstone, par exemple, les instructeurs pourraient améliorer le raisonnement des élèves en modélisant des façons de relier les informations macroscopiques, submicroscopiques et symboliques, ou fournir des conseils pour permettre aux élèves d'établir ces liens eux-mêmes. Cette solution permettrait de guider les étudiants vers une meilleure compréhension et favoriser des discussions plus explicites sur les relations entre les trois niveaux de Johnstone (Becker et al., 2015 ; Brunner, 1983 ; Vygotski, 1985).

Enfin, une méthode didactique proposée par la littérature et appelée étayage (Brunner, 1983) pourrait être utilisée lors des laboratoires de chimie organique afin de permettre aux étudiants de faire plus facilement des liens entre les trois niveaux de représentation. Cette solution pédagogique consiste en un outil utilisé dans le domaine de l'éducation pour décomposer des tâches vastes et complexes en tâches plus petites et plus faciles à gérer. Dans ce contexte, cet étayage consiste en un questionnaire en plusieurs parties utilisé lors des laboratoires de chimie organique (Figure 6). Dans la première partie du questionnaire, les étudiants doivent décrire l'objectif de l'étape de synthèse qu'ils réalisent et expliquer pourquoi ils travaillent sur cette étape. Dans la deuxième partie, les élèves doivent décrire et visualiser leurs observations, avant, pendant et après l'étape de synthèse. De plus, les élèves doivent dessiner un croquis de leurs observations avant et après l'étape de synthèse. Dans la troisième partie, les élèves doivent décrire ce qu'ils ont conclu, d'après leurs observations et visualiser le processus avant et après cette étape au niveau submicroscopique. Dans la quatrième partie, les étudiants doivent décider,

sur la base de leurs observations et des explications submicroscopiques, s'ils ont atteint l'objectif de l'étape de synthèse. Cette solution permettrait aux étudiants de pouvoir plus facilement faire le lien entre les trois niveaux de représentation (Keiner et al., 2021).

1. GOAL			
Name of the synthesis	Describe what you are doing in this synthesis step and explain why!		
Synthesis step	<div style="display: flex; justify-content: space-around;"> 123456 </div>		
<div style="display: flex; align-items: center; justify-content: center;"> It is easy for me ← → It is hard for me </div>			
2. OBSERVATION		3. PARTICLE LEVEL	
<p style="text-align: center; margin: 0;">Describe what you can observe during this step (before/during/after)</p> <ul style="list-style-type: none"> Describe how your observations can help you for the next synthesis step! 		<p style="text-align: center; margin: 0;">How can you make sense of what you can see?</p> <ul style="list-style-type: none"> Describe the properties and activities of your entities at the particle level before and after the reaction. What is happening during the reaction to the atoms, molecules and electrons? 	
<div style="border: 1px solid black; height: 100%;"></div>		<div style="border: 1px solid black; height: 100%;"></div>	
<div style="display: flex; justify-content: space-between;"> <div style="width: 48%; border: 1px solid black; height: 100%;"></div> <div style="width: 4%; border: 1px solid black; height: 100%;"></div> <div style="width: 48%; border: 1px solid black; height: 100%;"></div> </div>		<div style="display: flex; justify-content: space-between;"> <div style="width: 48%; border: 1px solid black; height: 100%;"></div> <div style="width: 4%; border: 1px solid black; height: 100%;"></div> <div style="width: 48%; border: 1px solid black; height: 100%;"></div> </div>	
<div style="display: flex; justify-content: space-between;"> <div style="width: 48%; border: 1px solid black; height: 100%;"></div> <div style="width: 4%; border: 1px solid black; height: 100%;"></div> <div style="width: 48%; border: 1px solid black; height: 100%;"></div> </div>		<div style="display: flex; justify-content: space-between;"> <div style="width: 48%; border: 1px solid black; height: 100%;"></div> <div style="width: 4%; border: 1px solid black; height: 100%;"></div> <div style="width: 48%; border: 1px solid black; height: 100%;"></div> </div>	
<div style="display: flex; align-items: center; justify-content: center;"> It is easy for me ← → It is hard for me </div>		<div style="display: flex; align-items: center; justify-content: center;"> It is easy for me ← → It is hard for me </div>	
4. Conclusion on the aim of this synthesis step			
Describe how you can recognize that you have achieved the goal of this step!			
<div style="display: flex; align-items: center; justify-content: center;"> I am sure that the goal of this step has been achieved. ← → I am unsure that the goal of this step has been achieved. </div>			

Figure 6 : Etayage utilisé dans le cours de laboratoire organique pour chaque étape de synthèse (Keiner et al., 2021).

1.5) Contexte de l'analyse des manuels

Après avoir exploré le triangle de Johnstone ainsi que les différentes sources de difficultés rencontrées par les élèves dans l'utilisation des niveaux de représentations macroscopique, submicroscopique et symbolique, ainsi que dans l'établissement de liens entre eux, il est pertinent de s'intéresser à une ressource pédagogique importante des élèves : les manuels scolaires et les ouvrages d'enseignement de 1^{er} cycle supérieur. En effet, aujourd'hui, ces ouvrages constituent une ressource pédagogique essentielle pour de nombreux enseignants, notamment dans le cadre des cours de chimie. Tout au long de leur parcours scolaire, du secondaire à l'université, les élèves utilisent une variété de manuels dans différentes disciplines, dont la chimie. Ces ouvrages jouent un rôle central dans leur apprentissage : ils proposent des exercices, contribuent à approfondir la compréhension des concepts enseignés en classe ou encore aident à préparer des évaluations. Les ouvrages pédagogiques influencent aussi fortement la manière d'enseigner des professeurs qui s'en inspirent pour préparer leurs cours. Les manuels scolaires forment ainsi un socle fondamental de l'apprentissage. Une question cruciale se pose alors : en lien avec le triangle de Johnstone abordé précédemment, comment et dans quelle mesure ces manuels mobilisent-ils les niveaux de représentations macroscopique, submicroscopique et symbolique ? Sont-ils conçus de manière à favoriser l'établissement de liens entre ces trois niveaux, qui est souvent une source de difficultés pour les élèves ? Cette problématique revêt une importance particulière, car les élèves éprouvent fréquemment des difficultés à naviguer entre ces différentes représentations. Ces difficultés pourraient être liées à la manière dont les manuels scolaires sont conçus. C'est pourquoi nous avons entrepris une analyse approfondie pour évaluer dans quelle mesure ces supports pédagogiques facilitent ou compliquent cette démarche. Cette analyse portera spécifiquement sur les aspects iconographiques des manuels scolaires, car ce sont les images qui offrent une représentation plus visuelle et intuitive des concepts, jouant ainsi un rôle clé dans l'apprentissage des élèves. En nous concentrant sur les représentations visuelles, nous pourrons examiner comment les images intègrent et articulent les niveaux macroscopique, submicroscopique et symbolique, et dans quelle mesure elles permettent d'établir des liens entre eux. De plus, cette étude sera réalisée non seulement dans une perspective temporelle, en étudiant les manuels au fil des années, mais aussi en tenant compte des évolutions entre les différents cycles d'études, du secondaire à l'université. Cette double approche permettra d'analyser les changements dans l'utilisation des représentations visuelles et leur progression dans la complexité selon les niveaux d'apprentissage. Notre étude se concentrera sur une analyse comparative des manuels de chimie utilisés dans l'enseignement secondaire supérieur en Belgique et en France, ainsi que des ouvrages destinés aux étudiants de première année de l'enseignement supérieur.

Chapitre 2 :

Matériels et méthodes

2.1) Mise en place des critères d'analyse

Nous allons à présent passer à l'analyse proprement dite des manuels scolaires. Pour cela, différents critères ont été élaborés pour réaliser cette analyse iconographique approfondie. Pour mettre en place ces critères, nous nous sommes inspirés de ceux développés par Gkitzia (2011) en les modifiant quelque peu (Figure 7). Dans cette partie, nous allons détailler les différents critères choisis pour cette analyse. Les cinq premiers critères sont identiques à ceux établis par Gkitzia. Seul le sixième critère est un critère supplémentaire ajouté par nos soins.

Criterion	Typology for each criterion
C1: Type of representation	i. Macro
	ii. Submicro
	iii. Symbolic
	iv. Multiple
	v. Hybrid
	vi. Mixed
C2: Interpretation of surface features	i. Explicit
	ii. Implicit
	iii. Ambiguous
C3: Relatedness to text	i. Completely related and linked
	ii. Completely related and unlinked
	iii. Partially related and linked
	iv. Partially related and unlinked
	v. Unrelated
C4: Existence and properties of a caption	i. Existence of appropriate caption (explicit, brief, comprehensive, providing autonomy)
	ii. Existence of problematic caption
	iii. No caption
C5: Degree of correlation between representations comprising a multiple one	i. Sufficiently linked
	ii. Insufficiently linked
	iii. Unlinked

Figure 7 : Critères utilisés par Gkitzia pour évaluer les figures (Gkitzia, 2011).

Tout d'abord, le **premier critère** fait référence au type de représentation incluse dans les manuels. Plusieurs types de représentation possibles peuvent être retrouvés : (1) Macroscopique, (2) Submicroscopique, (3) Symbolique, (4) Multiple, (5) Hybride et (6) Mixte. La représentation macroscopique correspond au niveau observable, c'est-à-dire ce que l'on peut observer à l'œil nu, toucher, ressentir, à l'échelle humaine. Un exemple de représentation macroscopique retrouvée dans les manuels est illustré à la figure 8. La représentation submicroscopique correspond au niveau particulière de la matière c'est-à-dire les points de vue moléculaire, atomique et ionique. Un exemple de représentation submicroscopique retrouvée dans les manuels est disponible à la figure 9. La représentation symbolique correspond notamment aux équations, aux formules chimiques et mathématiques et aux graphiques. Un exemple de représentation symbolique présente dans les manuels est illustré à la figure 10. Les représentations dites « multiple » et « hybride » correspondent à l'utilisation d'au moins deux niveaux de représentation. La différence entre ces deux représentations est que la représentation multiple montre un phénomène à deux ou trois niveaux sans superposer ces représentations alors que la représentation hybride superpose deux ou trois niveaux pour former une seule

représentation. Les figures 11 et 12 donnent un exemple illustratif de ces deux types de représentation. La figure 11 correspond à une représentation multiple puisqu'elle contient à la fois le niveau macroscopique représenté par le berlin et le niveau submicroscopique représenté par les atomes, cependant ces deux niveaux ne se combinent pas pour former une seule illustration. La figure 12 correspond à une représentation hybride puisqu'elle contient à la fois le niveau macroscopique représenté par le berlin et le niveau submicroscopique représenté par les molécules, cependant, comparée à la figure 11, celle-ci superpose les deux niveaux de représentation en une seule illustration. Pour finir, la représentation mixte correspond à la combinaison d'un niveau chimique (macroscopique, submicroscopique et symbolique) et un autre type de représentation comme l'analogie. La figure 13 ci-dessous permet d'illustrer la représentation mixte.



Figure 8 : Exemple de représentation macroscopique (Pirson, 2023).

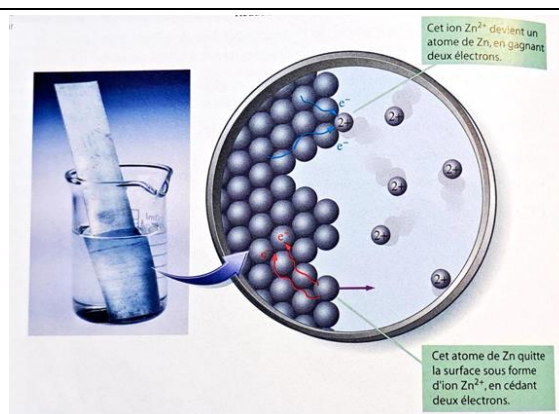


Figure 11 : Exemple de représentation multiple (Petrucchi et al., 2008).

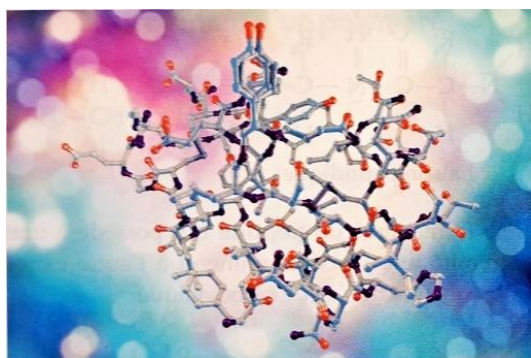


Figure 9 : Exemple de représentation submicroscopique (Pirson, 2023).

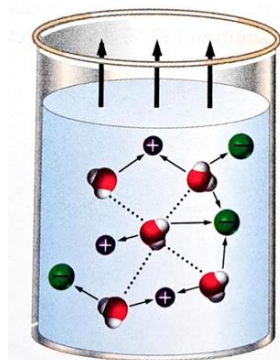


Figure 12 : Exemple de représentation hybride (Petrucchi et al., 2008).

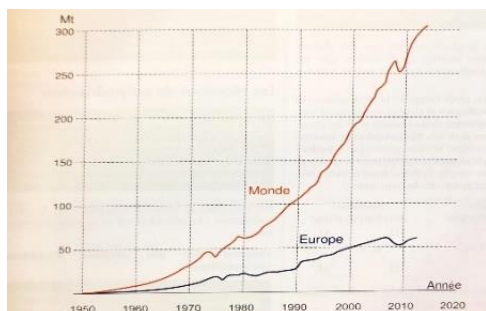


Figure 10 : Exemple de représentation symbolique (Pirson, 2023).

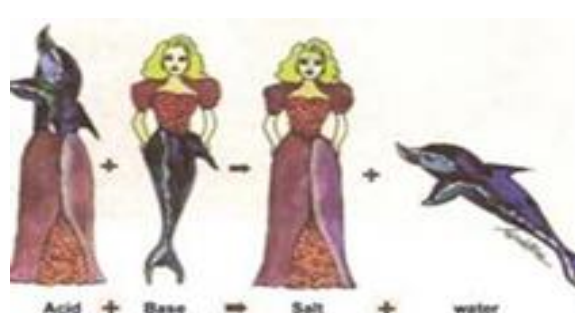


Figure 13 : Exemple de représentation mixte (Gkitzia, 2011).

Le **deuxième critère** fait référence à l'étiquetage des éléments d'une représentation. Plusieurs types d'étiquetage peuvent être retrouvés : (1) Complet, (2) Partiel, (3) Inexistant. Un étiquetage complet signifie que la signification de l'ensemble des éléments de la représentation est indiquée dans une légende, dans le chapitre ou dans l'ouvrage. Quant à l'étiquetage partiel, celui-ci signifie que la signification de seulement certains éléments de la représentation est fournie, et, enfin, l'étiquetage inexistant signifie qu'aucun élément n'est accompagné d'une signification. Ce critère permet d'identifier une source évitable de confusion pour les étudiants. En effet, lorsque les représentations ne mentionnent pas la signification de l'ensemble de leurs éléments, cela pourrait amener les élèves à une mauvaise compréhension du concept mis en avant par la représentation.

Le **troisième critère** utilisé dans cette analyse fait référence à la fois à la connexion qui peut exister entre le texte et les figures présentes dans les manuels mais également à la mention des figures dans le texte. Ce critère est très important à prendre en compte pour notre analyse. En effet, quand les illustrations ne sont que partiellement reliées au texte, comme dans les exemples, les étudiants doivent saisir un concept général à partir d'un cas spécifique, ce qui peut augmenter la charge cognitive des élèves. Par exemple, dans un chapitre sur les liaisons chimiques, un manuel illustre uniquement la liaison covalente avec l'exemple spécifique de la molécule de H_2 (deux atomes d'hydrogène partageant une paire d'électron). L'objectif du texte est d'expliquer le concept général de la liaison covalente, qui s'applique aussi à des molécules plus complexes comme H_2O ou CH_4 . Cependant, l'illustration ne montre que ce cas simple, sans indiquer explicitement comment ce concept s'étend à des molécules avec des structures plus complexes ou des géométries variées. Les étudiants doivent alors fournir un effort cognitif pour extrapoler ce concept à des systèmes où les liaisons covalentes impliquent des atomes différents, des partages d'électrons inégaux ou des structures tridimensionnelles complexes. Cette extrapolation non guidée peut alourdir leur charge cognitive et rendre plus difficile la compréhension globale de la notion de liaison covalente. Il est donc essentiel d'établir un lien explicite entre le texte et l'illustration, par exemple en utilisant des références directes telles que « dans la figure 1... » ou « comme nous pouvons le voir dans la figure suivante... », sinon les étudiants risquent de ne pas prêter attention à l'illustration, ou de ne pas comprendre le lien entre l'illustration et l'explication textuelle. Pour ce critère, la typologie suivante a été élaborée : (1) Complètement connectée et mentionnée ce qui signifie que la figure illustre le contenu du texte et que celle-ci est mentionnée dans le texte ; (2) Complètement connectée et non mentionnée ce qui signifie que la figure illustre le contenu du texte mais que celle-ci n'est pas mentionnée dans le texte ; (3) Partiellement connectée et mentionnée ce qui signifie que la figure n'est pas totalement en relation avec le texte mais que celle-ci est mentionnée dans le texte ; (4) Partiellement connectée et non mentionnée ce qui signifie que la figure n'est pas totalement en relation avec le texte et que celle-ci n'est pas mentionnée dans le texte ; (5) Non connectée ce qui signifie la figure n'est pas du tout en relation avec le texte.

Le **quatrième critère** de cette analyse permet de déterminer si une figure est accompagnée d'une légende ou d'un titre. En effet, les légendes ou les titres dans les figures des manuels possèdent une grande importance pour deux raisons : elles rendent le contenu et le message des représentations clairs et elles mettent en évidence les parties cruciales des figures, permettant une meilleure compréhension des concepts par les élèves. Dans les manuels, on peut retrouver :

(1) des figures avec des légendes appropriées c'est-à-dire une légende explicite, brève et complète, (2) des figures avec des légendes partiellement appropriées, mais également (3) des figures sans légende.

Le **cinquième critère** de cette analyse concerne uniquement les représentations multiples, hybrides et mixtes définies plus tôt dans le critère 1. Celui-ci fait référence au degré de corrélation entre représentations présentes pour ces trois représentations faisant appel à au moins deux points de vue (macroscopique, submicroscopique, symbolique). En effet, comme nous l'avons vu plus tôt les élèves éprouvent des difficultés à lier entre eux les différents niveaux de représentation (Xu, 2021). C'est pourquoi ce critère possède une grande importance. En effet, celui-ci permet de voir si les manuels eux-mêmes proposent de lier explicitement, et de manière suffisante les différents niveaux de représentation afin que les élèves soient eux-mêmes capables de réaliser des liens explicites entre ces niveaux de représentation. La typologie suivante a été choisie pour caractériser les représentations multiples, hybrides et mixtes : (1) Suffisamment connectées, (2) Partiellement connectées, (3) Non connectées.

Enfin, le **sixième critère** fait référence à l'objectif de la figure. En effet, chaque figure utilisée par les auteurs dans les manuels possède un objectif précis pour l'apprentissage des élèves. La typologie suivante a été élaborée afin de mettre en évidence les différents types d'objectifs possibles et n'est pas issue de Gkitzia (2011) : (1) Accrocher l'attention de l'élève soit par l'utilisation d'une belle figure, d'une figure historique ou encore d'une photo de scientifique ; (2) Donner une traduction visuelle d'une phrase au niveau expérimental ; (3) Schématiser à but explicatif ; (4) Montrer les rapports éventuellement partiels entre les niveaux macroscopique, submicroscopique et symbolique ; (5) Illustrer un montage expérimental ou une expérience ; (6) Montrer un graphique mathématique de type $y=f(x)$; (7) Montrer un tableau de données ou d'informations. Il est évident qu'une figure peut posséder plusieurs objectifs en même temps. On peut donc retrouver dans cette analyse des figures qui correspondent à plusieurs points définis dans ce critère. Les figures 14 à 20 illustrent chacun des objectifs possibles évoqués dans ce critère n°6.



Figure 14 : Exemple de représentation dont l'objectif est d'accrocher l'attention de l'élève (Pirson, 2023).

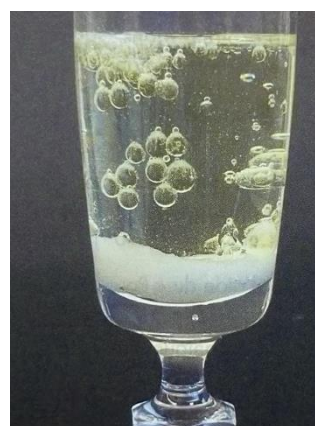


Figure 15 : Exemple de représentation dont l'objectif est de donner une traduction visuelle d'une phrase au niveau expérimental (Pirson, 2023).

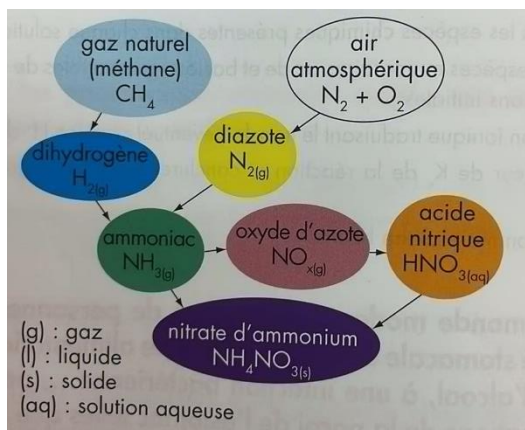


Figure 16 : Exemple de représentation dont l'objectif est de schématiser à but explicatif (Pirson, 2023).

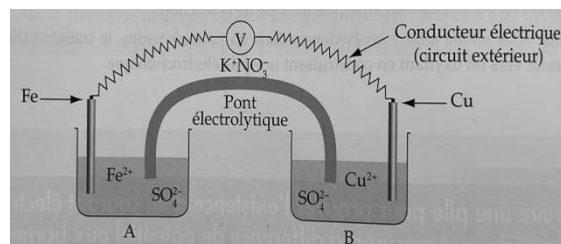


Figure 17 : Exemple de représentation dont l'objectif est de montrer les rapports éventuellement partiels entre les différents niveaux (Pirson, 2023).

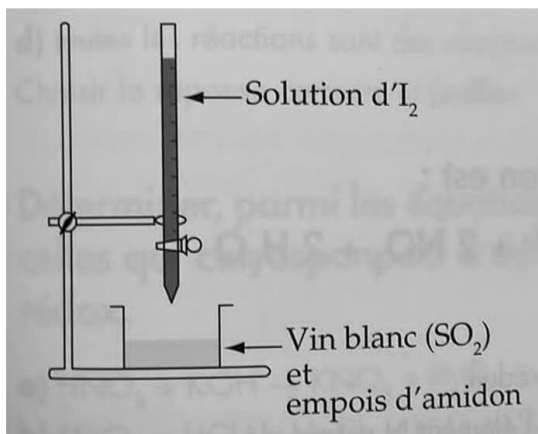


Figure 18 : Exemple de représentation dont l'objectif est d'illustrer un montage expérimental ou une expérience (Pirson, 2023).

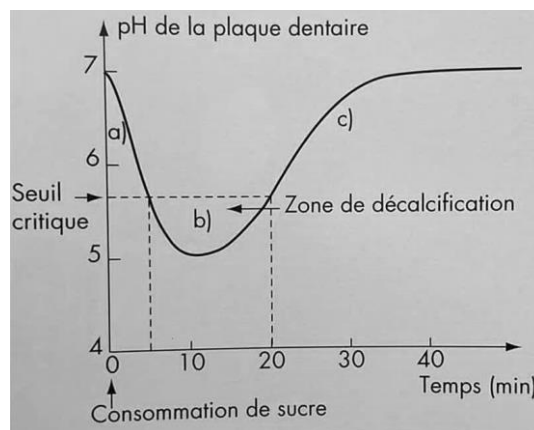


Figure 19 : Exemple de représentation dont l'objectif est de montrer un graphique mathématique de type $y=f(x)$ (Pirson, 2023).

Nom des acides ou ions	Formules	Bases conjuguées	K_a
Ion hydronium	H_3O^+	H_2O	55,5
Acide trichloroacétique	Cl_3CCOOH	Cl_3CCOO^-	$2,0 \cdot 10^{-1}$
Acide iodique	HIO_3	IO_3^-	$1,6 \cdot 10^{-1}$
Acide phosphorique	H_3PO_4	$H_2PO_4^-$	$6,3 \cdot 10^{-3}$
Acide carbonique	H_2CO_3	HCO_3^-	$4 \cdot 10^{-7}$
Ion dihydrogénophosphate	$H_2PO_4^-$	HPO_4^{2-}	$6,3 \cdot 10^{-8}$
Ion hydrogénocarbonique	HCO_3^-	CO_3^{2-}	$5 \cdot 10^{-11}$
Ion hydrogénéphosphate	HPO_4^{2-}	PO_4^{3-}	$5 \cdot 10^{-13}$
Eau	H_2O	OH^-	$1,8 \cdot 10^{-16}$

Figure 20 : Exemple de représentation dont l'objectif est de montrer un tableau de données ou d'informations (Pirson, 2023).

2.2) Calibrage

Avant de procéder à l'analyse complète des manuels du secondaire et du supérieur, une phase de calibrage initial a été réalisée pour vérifier la fiabilité de notre méthodologie, basée sur les critères définis dans la section 2.1. Dans ce cadre, en collaboration avec Vincent Natalis, assistant au laboratoire de didactique de la chimie, nous avons analysé la première partie du manuel *Pirson, P. (2023) (6^e année)*, couvrant les pages 5 à 81 incluses. Cette analyse, effectuée indépendamment en suivant les critères établis dans la section 2.1 et dont les résultats se trouvent en annexe 1, nous a permis de nous accorder sur leur interprétation. Par exemple, nous avons clarifié ce que nous considérons comme une figure macroscopique ou submicroscopique, ou ce qui constitue une légende appropriée ou encore ce que nous considérons comme un étiquetage complet d'une représentation. Ce travail de calibrage a ainsi assuré une compréhension commune et cohérente des critères entre les membres de l'équipe.

Le calibrage dans une analyse avec des critères a pour objectif d'ajuster et d'optimiser les paramètres ou les outils utilisés afin de garantir la précision, la fiabilité et la cohérence des résultats obtenus. Ce processus permet de s'assurer que les données recueillies sont correctement interprétées et que les conclusions tirées reflètent fidèlement la réalité ou l'intention de l'étude. Le calibrage est donc essentiel pour minimiser les biais, corriger les erreurs potentielles et renforcer la qualité globale de l'analyse, ce qui permet de prendre des décisions plus éclairées et pertinentes.

2.3) Calcul du Kappa de Cohen

Une fois l'analyse de la première partie (pages 5 à 81) du manuel *Pirson, P. (2023) (6^e année)* achevée, nous avons réalisé à nouveau indépendamment l'analyse des figures de la suite du manuel, des pages 82 à 226 incluses (annexes 2 et 3) et nous avons évalué la concordance de nos résultats à l'aide du coefficient Kappa de Cohen. Le coefficient Kappa de Cohen est une mesure statistique utilisée pour évaluer l'accord entre deux évaluateurs lorsqu'ils classent des éléments dans différentes catégories. Cette méthode est particulièrement utile lorsque les évaluations sont partiellement subjectives et que l'on souhaite déterminer dans quelle mesure les évaluateurs sont en accord au-delà du hasard. Ce coefficient permet de déterminer la fiabilité de notre analyse. Une explication détaillée du calcul de ce coefficient est fournie dans les sous-sections suivantes. Plusieurs étapes sont nécessaires à la détermination de ce coefficient.

2.3.1) Construction de la matrice

Pour réaliser le calcul du Kappa de Cohen (κ), il est nécessaire de construire une matrice de contingence notée K, où les lignes représentent les catégories assignées par un évaluateur et les colonnes représentent les catégories attribuées par un second évaluateur. Chaque cellule K_{ij} contient le nombre d'éléments classés simultanément par les deux évaluateurs dans la catégorie i pour l'un et j pour l'autre. Prenons l'exemple du critère n°1 défini dans la section 2.1. Dans le cas du critère 1, il y a plusieurs catégories possibles notées (1) Macroscopique, (2)

Submicroscopique, (3) Symbolique, (4) Multiple, (5) Hybride, (6) Mixte. On peut alors construire la matrice suivante (Figure 21)

	Macro	Submicro	Symb	Mult	Hyb	Mixte	Total
Macro	79	0	1	1	0	0	81
Submicro	0	1	0	0	0	0	1
Symb	1	0	43	0	1	0	45
Mult	7	0	0	4	1	0	12
Hyb	0	0	0	2	22	0	24
Mixte	0	0	0	0	0	0	0
Total	87	1	44	7	24	0	163

Figure 21 : Matrice du critère n°1 pour le calcul du Kappa de Cohen.

Cette matrice indique dans chaque case le nombre de situations correspondantes obtenues. Par exemple, le chiffre 7, indiqué en rouge dans la matrice ci-dessus signifie que, pour 7 représentations, Vincent les a attribuées comme macroscopiques alors que Chloé les considère comme multiples (Figure 21).

2.3.2) Calcul du coefficient Kappa de Cohen

Le coefficient Kappa de Cohen est défini par la formule suivante :

$$\kappa = \frac{P_o - P_r}{1 - P_r} \quad (1)$$

- P_o est la probabilité observée d'accord entre les deux évaluateurs et est donné par la formule :

$$P_o = \frac{\sum_{i=1}^N K_{ii}}{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N K_{ij}} \quad (2)$$

Autrement dit, P_o correspond au rapport entre le nombre total d'accords (valeurs diagonales de la matrice) et le nombre total d'éléments classés. Par exemple, si on calcule P_o pour la matrice du critère n°1 on obtiendra :

$$P_o = \frac{\sum_{i=1}^N K_{ii}}{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N K_{ij}} = \frac{149}{163} = 0.914$$

- P_r est la probabilité d'accord par chance entre les deux évaluateurs. Cette valeur repose sur l'hypothèse que les évaluateurs attribuent les catégories de manière aléatoire. Elle est calculée comme suit :

$$Pr = \sum_{i=1}^N PHi . PVi \quad (3)$$

- Avec PHi qui correspond à la proportion d'éléments classés dans la catégorie i par le premier évaluateur noté horizontalement (somme des valeurs de la $i^{\text{ème}}$ colonne divisée par le total des éléments). Cette valeur est donnée par la formule suivante :

$$PHi = \frac{\sum_{j=1}^N Kji}{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N Kij} \quad (4)$$

- Avec PVi qui correspond à la proportion d'éléments classés dans la catégorie i par le second évaluateur noté verticalement (somme des valeurs de la $i^{\text{ème}}$ ligne divisée par le total des éléments). Cette valeur est donnée par la formule suivante :

$$PVi = \frac{\sum_{j=1}^N Kij}{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N Kij} \quad (5)$$

Par exemple, pour le critère n°1, on obtient les valeurs suivantes :

$$PVi (1) = \frac{81}{163} = 0.497$$

$$PVi (2) = \frac{1}{163} = 0.00613$$

$$PVi (3) = \frac{45}{163} = 0.276$$

$$PVi (4) = \frac{12}{163} = 0.0736$$

$$PVi (5) = \frac{24}{163} = 0.147$$

$$PVi (6) = \frac{0}{163} = 0$$

$$PHi (1) = \frac{87}{163} = 0.534$$

$$PHi (2) = \frac{1}{163} = 0.00613$$

$$PHi (3) = \frac{44}{163} = 0.270$$

$$PHi (4) = \frac{7}{163} = 0.0429$$

$$PHi (5) = \frac{24}{163} = 0.147$$

$$PHi (6) = \frac{0}{163} = 0$$

$$Pr = \sum_{i=1}^N PHi . PVi = 0.365$$

Après avoir calculé les valeurs de P_0 et de P_r , il suffit de remplacer ces valeurs dans la formule générale du coefficient Kappa de Cohen. On obtient donc pour le critère n°1 une valeur de :

$$\kappa = \frac{Po - Pr}{1 - Pr} = \frac{0.914 - 0.365}{1 - 0.365} = 0.865$$

Il faut maintenant calculer le coefficient Kappa de Cohen pour chacun des critères. L'ensemble de ces calculs se trouvent en annexe 4. Les résultats obtenus pour les différents critères se trouvent dans le tableau ci-dessous (Tableau 1).

Critères	Coefficient Kappa de Cohen (κ)
Critère 1	0.865
Critère 2	0.824
Critère 3	0.792
Critère 4	0.889
Critère 5	0.254
Critère 6	0.828

Tableau 1 : Résultats du coefficient Kappa de Cohen pour les différents critères.

2.3.3) Interprétation du coefficient Kappa de Cohen

Après avoir calculé le coefficient Kappa de Cohen pour chacun des critères, il faut maintenant interpréter les résultats obtenus afin de déterminer le degré d'accord entre les deux évaluateurs (Vincent et Chloé). À cette fin, le tableau de Landis et Koch (1977) peut servir de guide (Tableau 2).

Valeurs du coefficient Kappa de Cohen	Degré d'accord
0.81-1.00	Presque parfait
0.61-0.80	Substantiel
0.41-0.60	Modéré
0.21-0.40	Moyen
0.00-0.20	Léger
<0.00	Faible

Tableau 2 : Tableau de Landis et Koch sur l'interprétation du coefficient Kappa de Cohen.

Par conséquent, on peut observer que, pour les critères n°1, 2, 4 et 6 on obtient un degré d'accord entre les deux évaluateurs qui est presque parfait et pour le critère n°3 on obtient un degré d'accord qui est substantiel. Ces valeurs reflètent une forte fiabilité entre les deux évaluateurs. Cela suggère également que les divergences entre évaluateurs, bien que présentes, sont marginales et peuvent résulter de différences d'interprétation ou d'erreurs humaines isolées. Cependant, on observe que le critère n°5 possède un degré d'accord moyen entre les évaluateurs ce qui nécessite une attention particulière pour garantir la fiabilité de ce critère. Cette valeur peut s'expliquer par le fait que le nombre total d'éléments classés pour ce critère, dans ce cas 28, est faible ce qui augmente sans aucun doute la possibilité que l'effet du hasard joue un rôle important. On peut donc faire l'hypothèse, grâce à ces calculs des coefficients Kappa de Cohen, que la fiabilité inter-correcteurs est bonne dans l'ensemble et que le codage peut être réalisée à l'aide des critères définis dans la section 2.1.

Chapitre 3 :

Les manuels de chimie de l'enseignement secondaire

3.1) Choix des manuels

Pour réaliser cette analyse de manuels de l'enseignement secondaire, nous avons sélectionné plusieurs manuels différents. En premier lieu, nous avons sélectionné 5 livres belges du secondaire dont 3 manuels de 6^{ème} secondaire datant de 1990, 2003 et 2023, 1 manuel de 5^{ème} secondaire datant de 2022 et 1 manuel de 4^{ème} secondaire datant également de 2022. En second lieu, nous avons sélectionné 4 manuels français dont 3 manuels de terminale datant de 1995, 2016 et 2020 et 1 manuel de première datant de 2019. Cette sélection a été choisie afin de pouvoir comparer les manuels au fil du temps, au fil des années scolaires mais également dans différents pays. Grâce à ce choix, nous serons capables d'effectuer une analyse approfondie de ces manuels francophones. Voici la liste des manuels de secondaire choisis :

- Pirson, P., Bribosia, A., Martin, C.L., & Tadino, A. (1990). *Chimie Sciences expérimentale 6e rénové* (2ème éd.). De Boeck & Larcier.
- Pirson, P., Bribosia, A., Martin, C.L., & Tadino, A. (2003). *Chimie Sciences générales 6e*. De Boeck & Larcier.
- Pirson, P., Bribosia, A., Snauwaert, P., Tadino, A., & Van Elsuwé, R. (2022). *Chimie Sciences générales 5e* (1ère éd.). Wommelgem : De Boeck.
- Pirson, P., Bordet, H., Snauwaert, P., & Van Elsuwé, R. (2022). *Chimie Sciences générales 4e* (1ère éd.). Wommelgem : De Boeck.
- Pirson, P., Bribosia, A., Snauwaert, P., Tadino, A., & Van Elsuwé, R. (2023). *Chimie Sciences générales 6e* (3ème éd.). Wommelgem : De Boeck.
- Antczak, S., & Fiat, O. (2020). *Physique Chimie*. Hatier.
- Arer, L., Berthelot, S., & Lévêque, T. (2019). *Ire Physique Chimie Nouveau Programme*. Belin Education.
- Dulaurans, T., & Durupthy, A. (2016). *Physique Chimie Enseignement spécifique* (3ème éd.). Hachette Education.
- Villar, J.-G., Bouland, A., Cauwet, J., Menny, J., Paul, J.-C., & Rivière, A. (1995). *Chimie, Collection Galileo*. Bordas.

3.2) Résultats descriptifs de l'analyse des manuels belges

Dans le cadre de cette étude portant sur les manuels d'enseignement secondaire, l'objectif principal consiste à examiner dans quelle mesure et avec quelle fréquence ces ouvrages de chimie mobilisent les niveaux de représentation macroscopique, submicroscopique et symbolique, ainsi qu'à évaluer s'ils sont conçus de manière à favoriser l'établissement de connexions entre ces trois niveaux chez les élèves. Pour ce faire, une analyse détaillée de chacun des manuels sélectionnés, tels qu'identifiés dans la section 3.1, a été réalisée en s'appuyant sur les divers critères choisis et décrits au chapitre 2. L'ensemble des analyses effectuées est consigné dans les annexes 5 et 6. À l'issue de ce travail, plusieurs résultats quantitatifs ont été obtenus et présentés sous forme de tableaux dans les annexes 8 et 9. Avant de réaliser cette analyse, il faut évidemment garder en tête que comparer les livres de secondaire entre eux est assez compliqué car les programmes ont évolué au cours du temps et ne sont pas les mêmes dans différents pays. De plus, les chapitres abordés par année ne sont pas identiques ce qui peut parfois apporter certaines difficultés dans l'analyse.

Les résultats obtenus pour les manuels de secondaire belge sont présentés en trois sous-sections. La première sous-section concerne les objectifs des figures (critère n°6). La deuxième sous-section concerne les connexions macroscopique-submicroscopique-symbolique (critères n°1 et 5) et la troisième sous-section concerne la qualité des figures (critères n°2, 3 et 4).

3.2.1) Objectifs des figures

Examinons tout d'abord le sixième critère relatif à l'objectif des figures. D'après la figure 22 ci-dessous, plusieurs observations peuvent être formulées concernant l'utilisation des figures, dans les différents manuels belges étudiés, en fonction de leurs objectifs spécifiques. Le premier objectif qui est d'accrocher l'attention de l'élève, représenté en rouge, montre une augmentation notable dans les manuels plus récents. Par exemple, le manuel *Pirson, P. (2023) (6^e année)* se distingue avec **48 %** de figures dédiées à cet objectif, un chiffre nettement supérieur à celui des éditions plus anciennes, comme le manuel *Pirson, P. (1990) (6^e année)*, qui en compte seulement **7 %**. Cette progression illustre une priorité croissante accordée à la captation de l'attention de l'élève dans les éditions les plus récentes. Le deuxième objectif qui est de donner une traduction visuelle d'une phrase au niveau expérimental, représenté en orange, reste stable dans la majorité des manuels, avec des valeurs faibles oscillant entre **0 %** et **4 %**. Le troisième objectif qui est de schématiser à but explicatif, en jaune, montre une diminution notable dans les manuels plus récents, comme *Pirson, P. (2023) (6^e année)* avec **11 %** de figures, contre **34 %** dans l'édition de 1990. Pour le quatrième objectif qui est de montrer les rapports entre niveaux submicroscopique, macroscopique et symbolique, les figures correspondant à ce critère, illustrées en vert, connaissent une augmentation modérée dans les manuels récents. Par exemple, pour les manuels de 6^e année, on note un passage de **6 %** de figures en 1990 à **12 %** en 2023. En revanche, les pourcentages restent faibles (**5 %** et **6 %**) pour les manuels récents de 4^e et 5^e années. Le cinquième objectif qui est d'illustrer un montage expérimental ou une expérience, représenté en bleu clair, présente également des variations modérées. On note par

exemple 9 % de figures dans le manuel *Pirson, P. (2023) (6^e année)*, contre 14 % dans l'édition de 1990, ce qui indique une légère réduction dans l'importance accordée à ce type d'illustration. Les sixième et septième objectifs qui sont de montrer un graphique mathématique ou un tableau de données, montrent une diminution nette dans les manuels les plus récents. On passe ainsi de 38 % pour le manuel *Pirson, P. (1990) (6^e année)* à 17 % pour l'ouvrage équivalent de 2023.

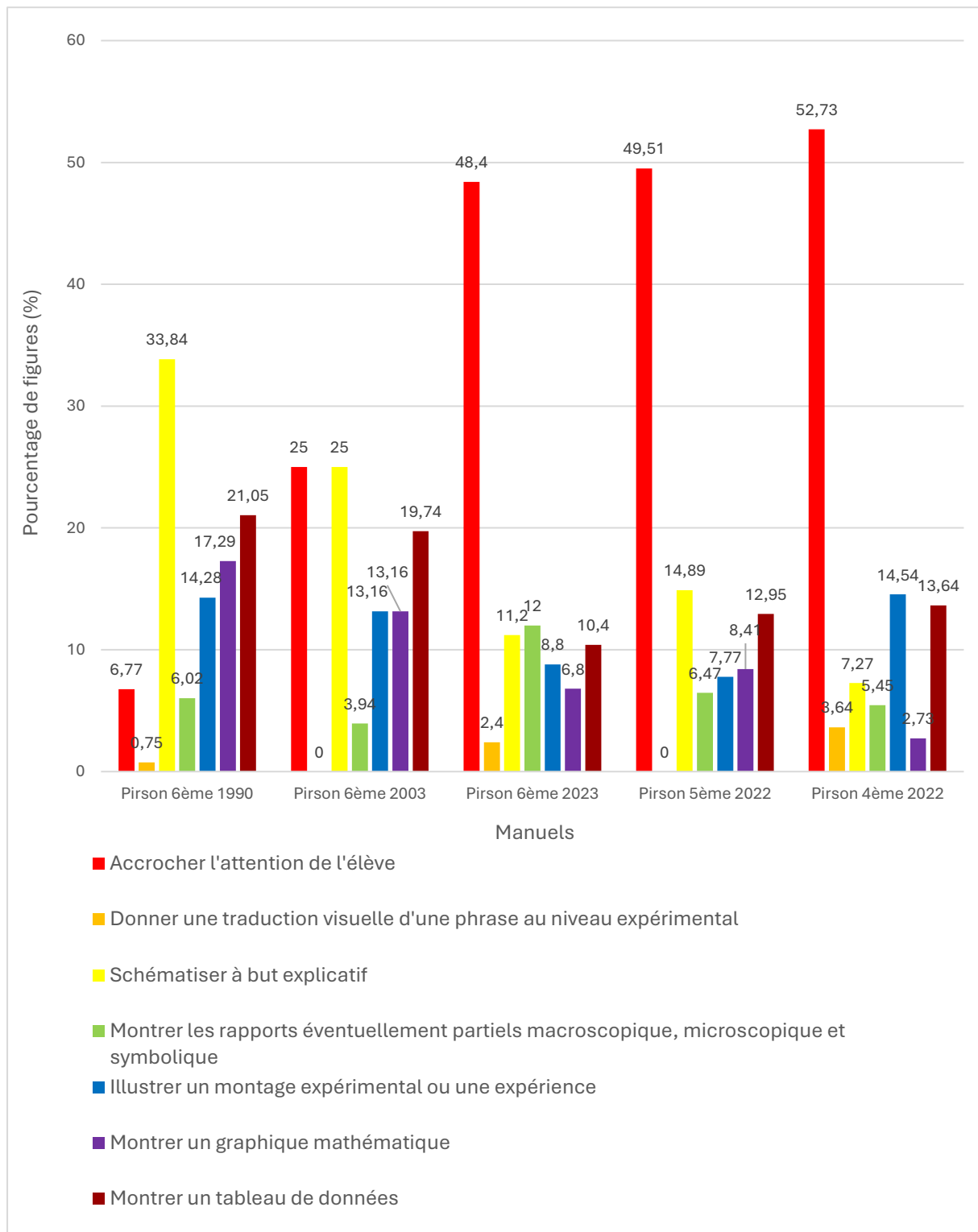


Figure 22 : Graphique du nombre de figure en fonction du critère n°6 selon les différents manuels de secondaire belges.

On observe en général, dans l'ensemble des manuels, que l'objectif principal des figures est d'accrocher l'attention des élèves. Seul le manuel *Pirson, P. (1990) (6^e année)* a pour objectif principal de schématiser à but explicatif. On constate également que les rapports entre les trois niveaux de représentation de Johnstone restent un objectif minoritaire qui atteint difficilement **10 %** des figures, même dans les éditions les plus récentes. (Figure 22)

3.2.2) Connexion macroscopique-submicroscopique-symbolique

Abordons le premier critère relatif aux types de représentation présentes dans les manuels. Une observation préliminaire notable réside dans l'absence quasi systématique de représentations submicroscopiques dans l'ensemble des manuels étudiés. Ces ouvrages privilégient essentiellement des illustrations relevant des niveaux macroscopique et symbolique, ou d'une combinaison de ces deux types. En revanche, les figures submicroscopiques occupent une place beaucoup moins importante, avec une proportion oscillant autour de **0 % à 3 %**. En outre, les représentations intégrant simultanément les trois niveaux (macroscopique, submicroscopique et symbolique) demeurent extrêmement rares. Ces constats sont illustrés dans le graphique présenté ci-après (Figure 23).

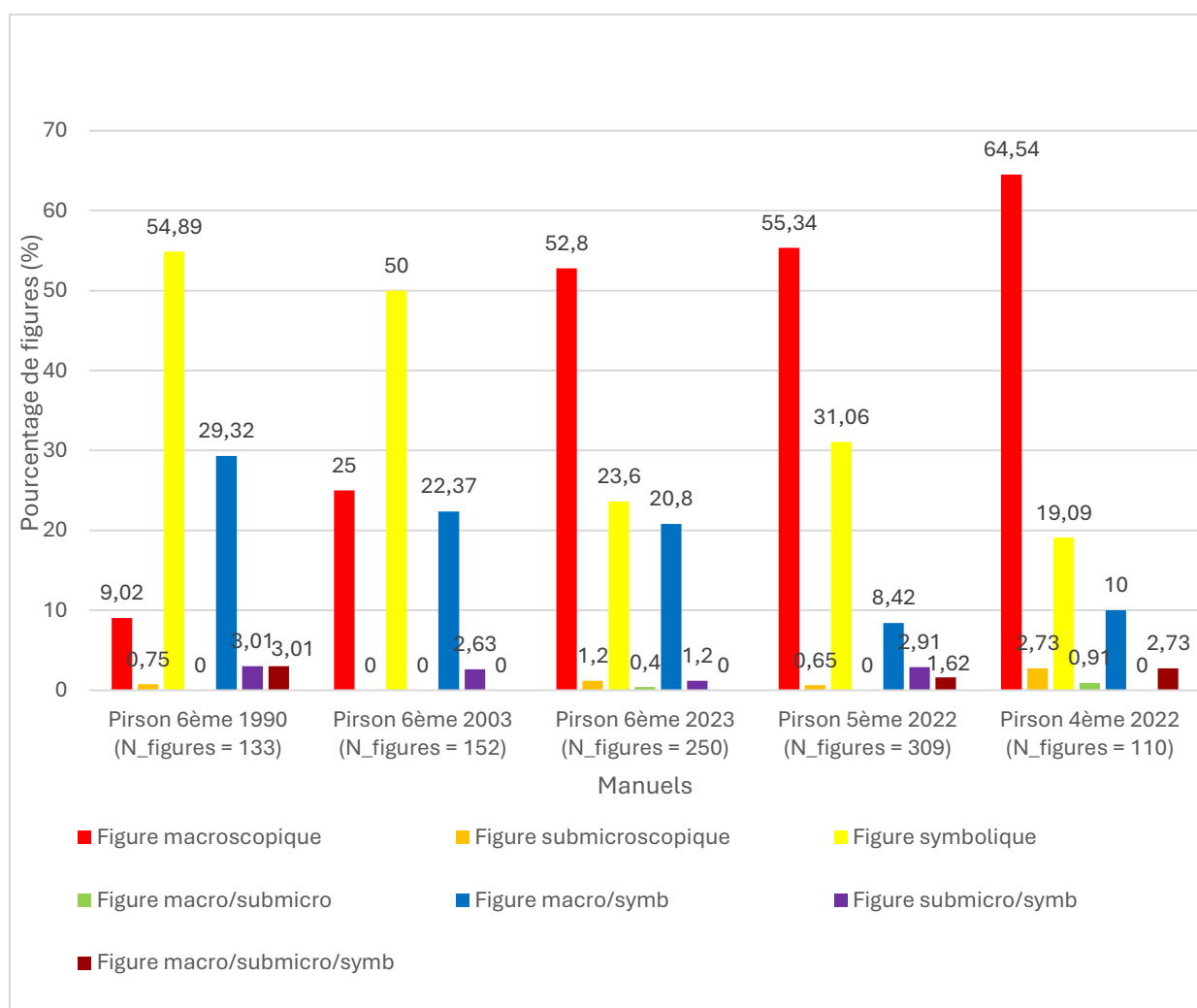


Figure 23 : Graphique du pourcentage de chaque type de représentation en fonction des différents manuels de secondaire belges.

En examinant l'évolution des manuels de 6^e secondaire au fil du temps, de 1990 à 2023, plusieurs observations méritent d'être soulignées. Premièrement, on constate une augmentation importante des représentations de type macroscopique au cours des années. Par exemple, dans le manuel *Pirson, P. (1990) (6^e année)*, les représentations macroscopiques représentent **9%** des figures. Ce pourcentage grimpe à **53 %** dans le manuel *Pirson, P. (2023) (6^e année)* (Figure 23). Cette tendance révèle une orientation marquée des manuels récents vers un usage accru des représentations macroscopiques. Deuxièmement, on observe une diminution notable des représentations de type symbolique au fil des années. Le manuel de 1990 présente **55 %** de figures symboliques, contre seulement **24 %** dans l'édition de 2023 (Figure 23). Cela témoigne d'une diminution de l'utilisation des représentations symboliques dans les manuels récents. Troisièmement, une augmentation globale du nombre de figures dans les manuels est à relever. Cette évolution suggère une approche pédagogique reposant davantage sur des illustrations visuelles dans les éditions les plus récentes. Enfin, on note une réduction progressive du pourcentage de figures combinant au moins deux niveaux de représentation (macroscopique, submicroscopique, et symbolique). Si on considère la somme des différentes combinaisons possibles, ce pourcentage passe de **35 %** dans le manuel de 1990 à **22 %** dans celui de 2023 (Figure 23). Cette tendance indique que les manuels contemporains établissent moins de liens explicites entre les différents niveaux de représentation par rapport à leurs prédécesseurs.

En examinant l'évolution des manuels récents (*Pirson, P. (2022-2023)*), selon les années scolaires, de la 4^e à la 6^e, plusieurs éléments significatifs se dégagent. Premièrement, on note une légère diminution du nombre de représentations macroscopiques entre le manuel de 4^e (2022) et celui de 6^e (2023). Plus précisément, le manuel *Pirson, P. (2022)* de 4^e année, contient **65 %** de figures de type macroscopique. Ce pourcentage diminue à **53 %** dans le manuel *Pirson, P. (2023)* de 6^e année (Figure 23). Deuxièmement, une augmentation notable des représentations symboliques est observable dans le manuel de 5^e (2022), où ces figures représentent **31 %** des illustrations par rapport à **19 %** (manuel de 4^e) et **24 %** (manuel de 6^e). Ces variations peuvent s'expliquer par la différence de thèmes abordés dans les chapitres des manuels selon les niveaux scolaires. En effet, les contenus pédagogiques spécifiques à chaque année influencent directement les types de représentation privilégiées dans les ouvrages. (Figure 23). Par exemple, en 4^e secondaire, le chapitre sur les états de la matière favorise l'utilisation de figures macroscopiques, telles que des images illustrant des glaçons qui fondent, de l'eau qui bout ou de la vapeur dans un récipient. En revanche, en 5^e secondaire, le chapitre sur la cinétique chimique privilégie les figures symboliques, comme des graphiques de concentration ou des schémas détaillant les mécanismes réactionnels.

Examinons à présent le cinquième critère, relatif au degré de corrélation entre les différentes représentations présentes au sein des figures de type multiple, hybride et mixte. Avant d'aborder cette analyse, il est nécessaire de déterminer le nombre de figures relevant de ces catégories dans les divers manuels, ce qui peut être établi à partir de l'analyse du premier critère. Les résultats correspondants sont illustrés dans la figure 24. De manière générale, il apparaît que les figures comportant plusieurs représentations sont majoritairement de type hybride, c'est-à-dire qu'elles intègrent des caractéristiques appartenant à deux ou trois niveaux pour constituer une

seule représentation cohérente. Cependant, une augmentation notable du nombre de figures de type multiple est observée dans les manuels les plus récents (Figure 24).

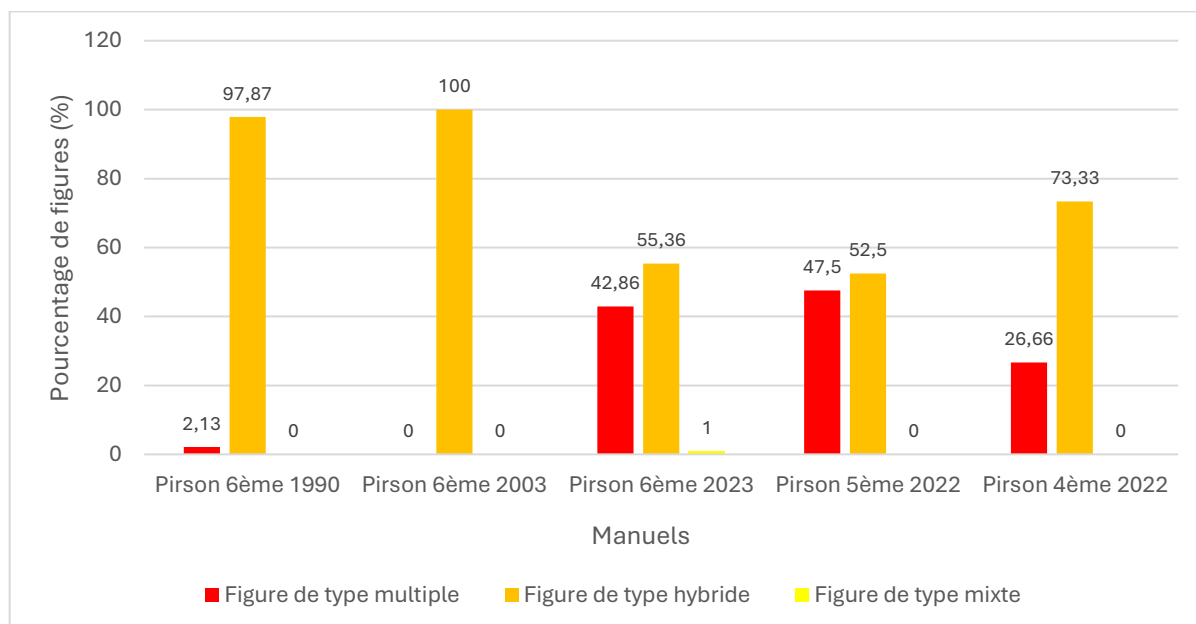


Figure 24 : Graphique du pourcentage de figure multiple, hybride et mixte dans les différents manuels de secondaire belges.

À présent que le nombre de figures de type multiple, hybride et mixte a été établi, nous pouvons examiner leur degré de corrélation dans les différents manuels de l'enseignement secondaire analysés. Il ressort de cette étude que, dans l'ensemble des manuels, les figures à plusieurs représentations sont presque toujours adéquatement connectées. Ce constat suggère que, bien que les figures à plusieurs représentations soient peu nombreuses, les relations entre ces représentations sont généralement bien établies et cohérentes (Figure 25).

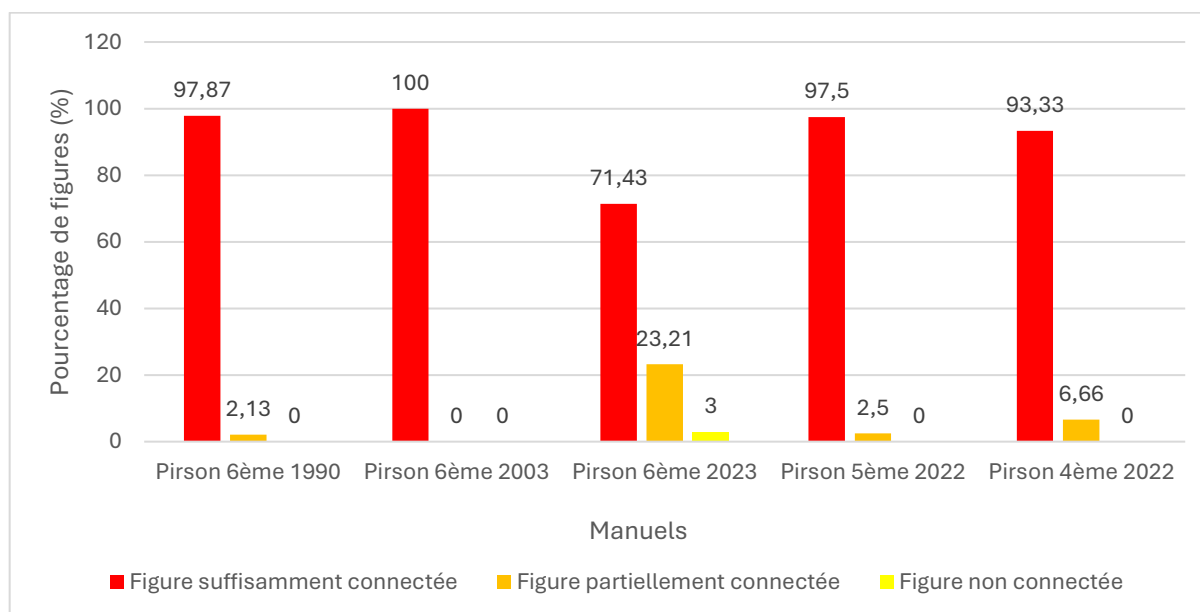


Figure 25 : Graphique du pourcentage de figure en fonction du critère n°5 selon les différents manuels de secondaire belges.

3.2.3) Qualité des figures

Abordons maintenant le second critère, relatif à l'étiquetage des figures. Une première observation majeure est la diminution progressive du pourcentage de figures correctement étiquetées au fil du temps. Par exemple, dans le manuel *Pirson, P. (1990) (6^e année)*, **86 %** des figures sont correctement étiquetées. Ce chiffre chute à **36 %** dans le manuel *Pirson, P. (2023) (6^e année)* (Figure 26). Cette tendance suggère que les manuels plus anciens accordaient une attention particulière à l'étiquetage précis des figures, contrairement aux éditions récentes. En ce qui concerne l'évolution selon les années scolaires, les différences sont peu marquées. Les pourcentages de figures correctement étiquetées dans le manuel de 4^e (2022) et dans le manuel de 6^e (2023) restent relativement similaires et, indiquant une certaine stabilité à ce niveau. Par exemple, dans le manuel *Pirson, P. (2022) (4^e année)* on peut observer un pourcentage de **35 %** de figures correctement étiquetées alors que dans le manuel *Pirson, P. (2023) (6^e année)*, on observe un pourcentage de **36 %** (Figure 26).

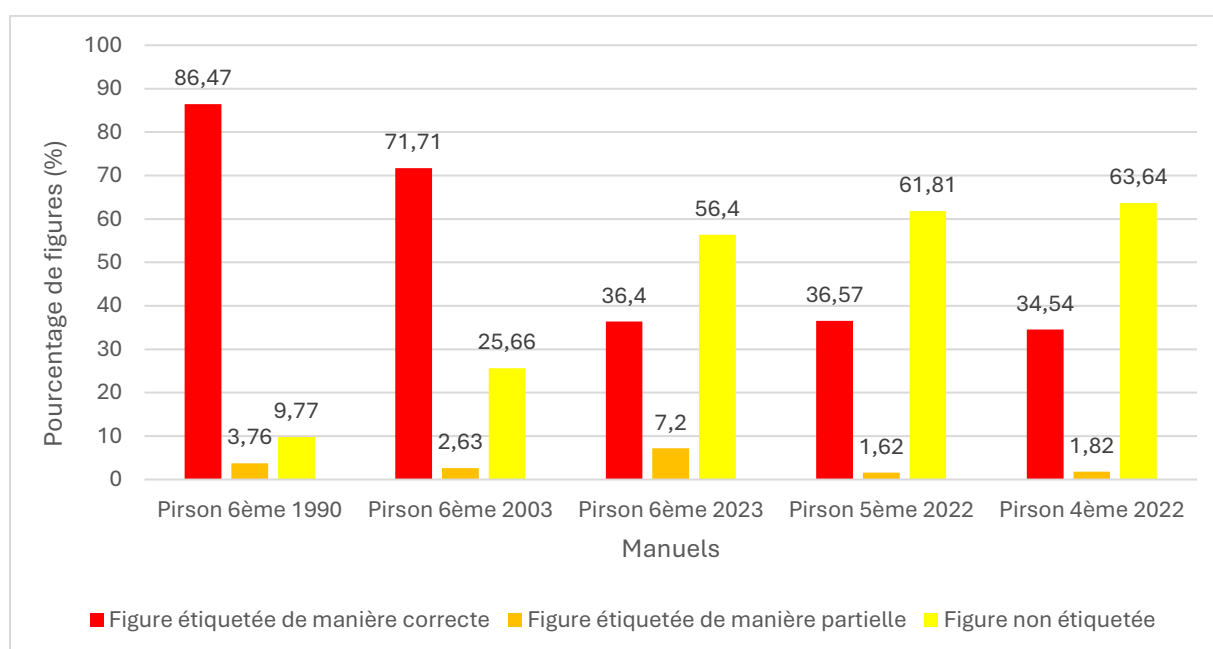


Figure 26 : Graphique du pourcentage de figure en fonction du type d'étiquetage selon les différents manuels de secondaire belges.

En observant plus en détail les résultats relatifs au second critère, concernant l'étiquetage des figures, plusieurs observations importantes émergent (Figure 27). Premièrement, dans les manuels de l'enseignement secondaire, les figures de type macroscopique sont généralement moins bien étiquetées que celles de type symbolique ou celles combinant plusieurs niveaux de représentation. Cela peut s'expliquer par le fait que les figures symboliques sont pour la plupart des graphiques et des diagrammes qui, par nature, appellent un étiquetage. De plus, une tendance décroissante est perceptible dans l'étiquetage correct des figures macroscopiques au fil du temps. Par exemple, dans le manuel *Pirson, P. (1990) (6^e année)*, **33 %** des figures macroscopiques sont correctement étiquetées, tandis que ce pourcentage chute à **2 %** dans le manuel *Pirson, P. (2023) (6^e année)*. En ce qui concerne les figures de type symbolique, le pourcentage de figures correctement étiquetées reste relativement stable au fil du temps. Cependant, une forte diminution est observée pour les figures combinant plusieurs niveaux de

représentation, particulièrement marquée lorsque l'on compare les manuels des années 1990 (87 %) et 2003 (95 %) à ceux de 2023 (52 %). Cela indique que les manuels plus anciens contiennent des figures globalement mieux étiquetées ou que les manuels plus récents utilisent plus de figures macroscopiques « illustratives pures » qui sont généralement moins bien étiquetées. Enfin, en analysant l'évolution selon les années scolaires, une très légère diminution de l'étiquetage correct est notée tant pour les figures macroscopiques que pour les figures symboliques, entre les manuels de 4^e et de 6^e année secondaire. Ces observations suggèrent une certaine uniformité dans les pourcentages d'étiquetages corrects des figures entre les différents niveaux scolaires. Quant aux figures submicroscopiques pures dont le pourcentage est de toute façon très faible (< 3 %), leur étiquetage est absent.

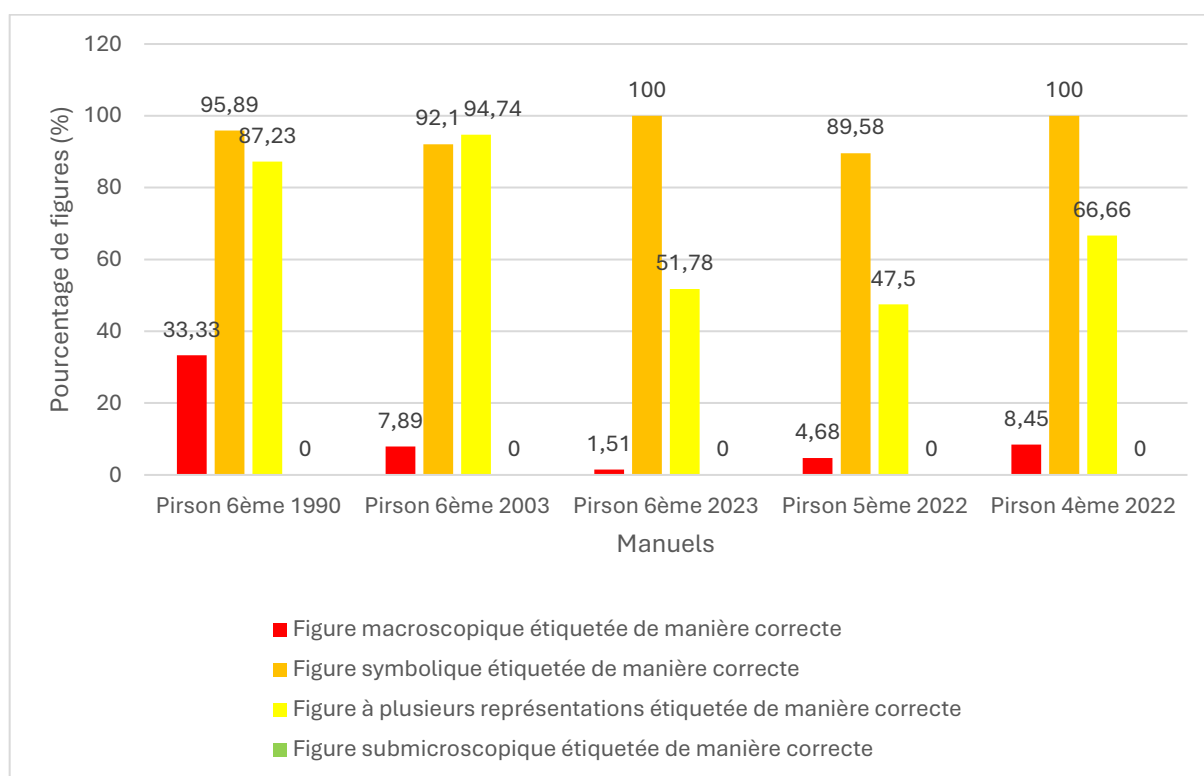


Figure 27 : Graphique du pourcentage de chaque type de figure en fonction du type d'étiquetage selon les différents manuels de secondaire belges.

Analysons à présent le troisième critère, qui porte à la fois sur le lien entre le texte et les figures présentes dans les manuels, ainsi que sur la mention explicite de ces figures dans le texte. Une observation majeure s'impose : dans l'ensemble des manuels, qu'ils soient anciens ou récents, un nombre significatif de figures n'est pas mentionné dans le texte. Cependant, une tendance se dégage : plus les manuels sont récents, plus le pourcentage de figures non mentionnées augmente. Ainsi, en comparant le manuel *Pirson, P. (1990) (6^e année)*, avec le manuel *Pirson, P. (2023) (6^e année)*, on constate une augmentation de ce pourcentage, passant de 59 % à 72 % (incluant l'ensemble des catégories impliquant l'absence de mention). Au fil des années scolaires, on observe une certaine stabilité. Par exemple, entre le manuel *Pirson, P. (2022) (4^e année)*, et le manuel *Pirson, P. (2023) (6^e année)*, le pourcentage de figures non mentionnées passe de 70 % à 72 %, soit une variation non significative. Ces observations suggèrent que les manuels plus anciens accordaient une attention plus soutenue à la mention des figures dans le

texte, en comparaison avec les éditions plus récentes. Concernant la connexion entre les figures et le texte, il est notable que, pour l'ensemble des manuels destinés à l'enseignement secondaire, les figures sont généralement bien intégrées et en lien direct avec le contenu textuel (Figure 28). Cependant, on observe tout de même une diminution modérée du pourcentage des figures connectées avec le texte lorsque l'on passe du manuel de 6^e de 1990 (**100 %**) au manuel de 6^e de 2023 (**81 %**). Une dernière observation intéressante, observée dans la figure 29, est que les figures de type macroscopique sont mentionnées dans le texte de manière nettement moins fréquente que celles de type symbolique, lesquelles bénéficient d'une mention bien plus récurrente dans le texte (Figure 29).

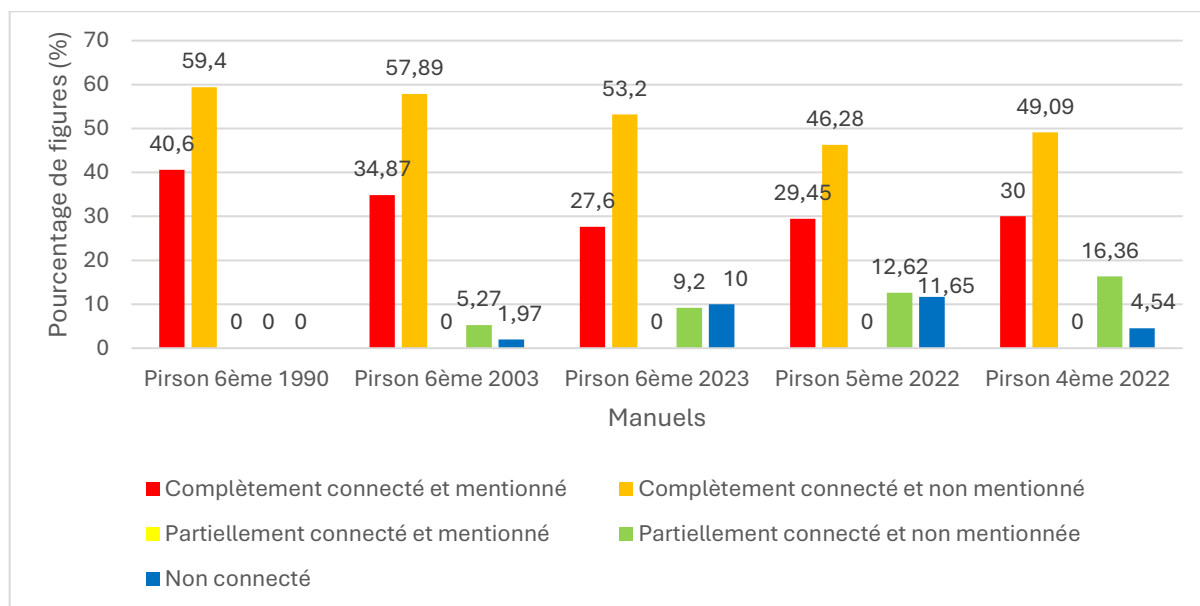


Figure 28 : Graphique du pourcentage de figure en fonction du critère n°3 selon les différents manuels de secondaire belges.

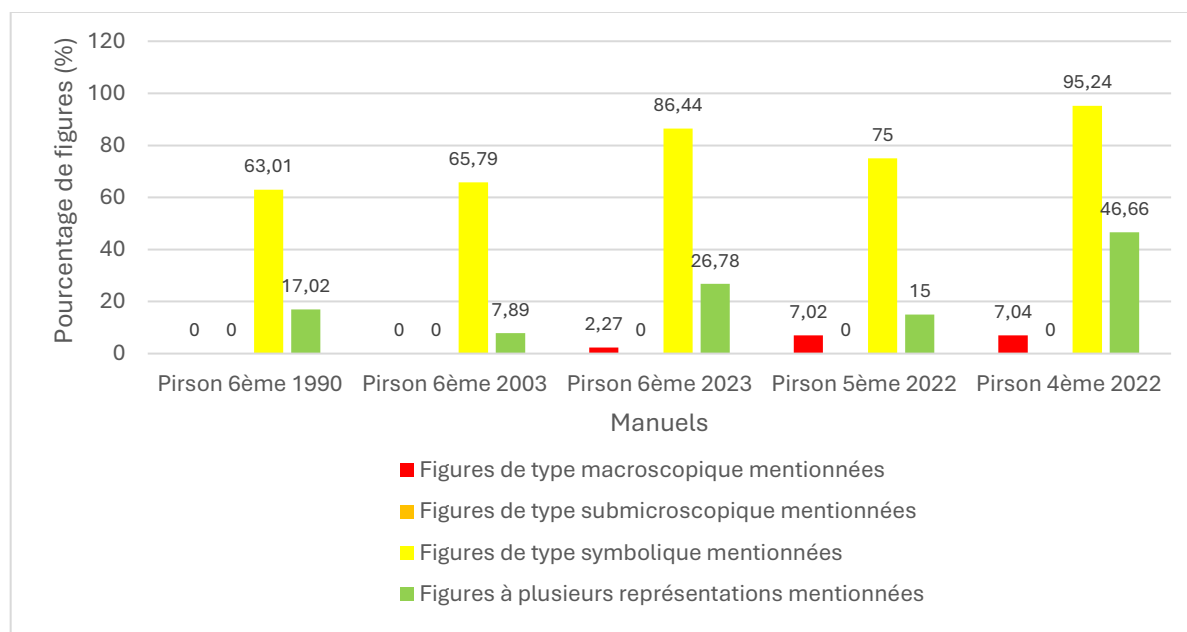


Figure 29 : Graphique du pourcentage de chaque type de figure en fonction du critère n°3 selon les différents manuels de secondaire belges.

Le quatrième critère est relatif aux légendes et aux titres accompagnant les figures. Une observation globale révèle que la majorité des manuels de l'enseignement secondaire contiennent un nombre significatif de figures dépourvues de légendes. L'analyse diachronique, couvrant la période de 1990 à 2023, met en évidence une légère augmentation de la proportion de figures sans légendes. Par exemple, dans le manuel *Pirson, P. (1990) (6^e année)*, 71 % des figures ne disposent pas de légende. Ce pourcentage atteint la valeur importante de 86 % dans le manuel *Pirson, P. (2023) (6^e année)* (Figure 30). Cette tendance semble indiquer que les manuels plus anciens négligeaient un peu moins les légendes exhaustives que les éditions plus récentes. En ce qui concerne l'évolution selon les niveaux scolaires, les variations demeurent peu importantes. Ainsi, les pourcentages de figures exemptes de légendes dans le manuel de 4^e (2022) et dans celui de 6^e (2023) restent relativement proches, passant de 91 % à 88 %, témoignant d'une certaine constance à ce niveau (Figure 30).

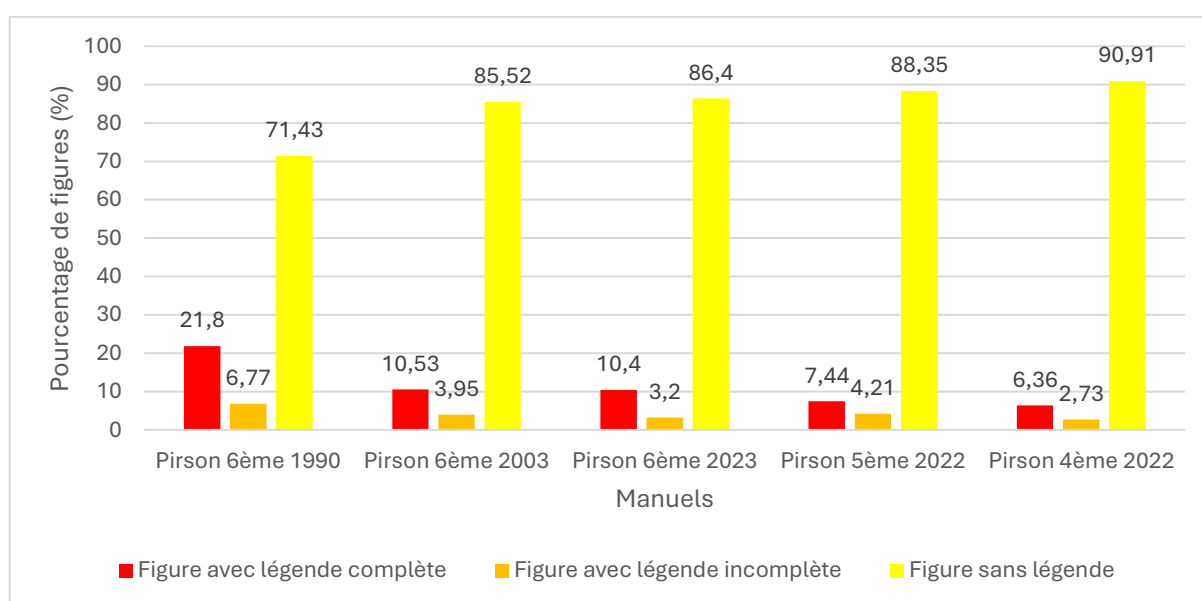


Figure 30 : Graphique du pourcentage de figure en fonction du critère n°4 selon les différents manuels de secondaire belges.

En analysant plus en détail les résultats associés au quatrième critère, relatif aux légendes et titres des figures, plusieurs observations significatives se dégagent (Figure 31). Tout d'abord, une diminution progressive du pourcentage de figures macroscopiques accompagnées de légendes suffisantes est perceptible au fil du temps. Par exemple, dans le manuel *Pirson, P. (1990) (6^e année)*, 33 % des figures macroscopiques bénéficient d'un légendage adéquat, un pourcentage qui chute à 11 % dans le manuel *Pirson, P. (2023) (6^e année)*. Un constat similaire s'applique aux figures de type symbolique, dont le taux de légendage approprié diminue de 19 % en 1990 à 8 % en 2023 pour les manuels de 6^e année. Une tendance comparable est également observée pour les figures présentant plusieurs représentations, ce qui souligne que les éditions plus anciennes accordent plus de soin aux légendes. Enfin, en examinant les variations selon les années scolaires, une légère augmentation du pourcentage de légendes adéquates est observée entre les manuels de 4^e et de 6^e année, passant de 6 % à 11 %. En revanche, pour les figures de type symbolique, une évolution inverse est constatée (Figure 31).

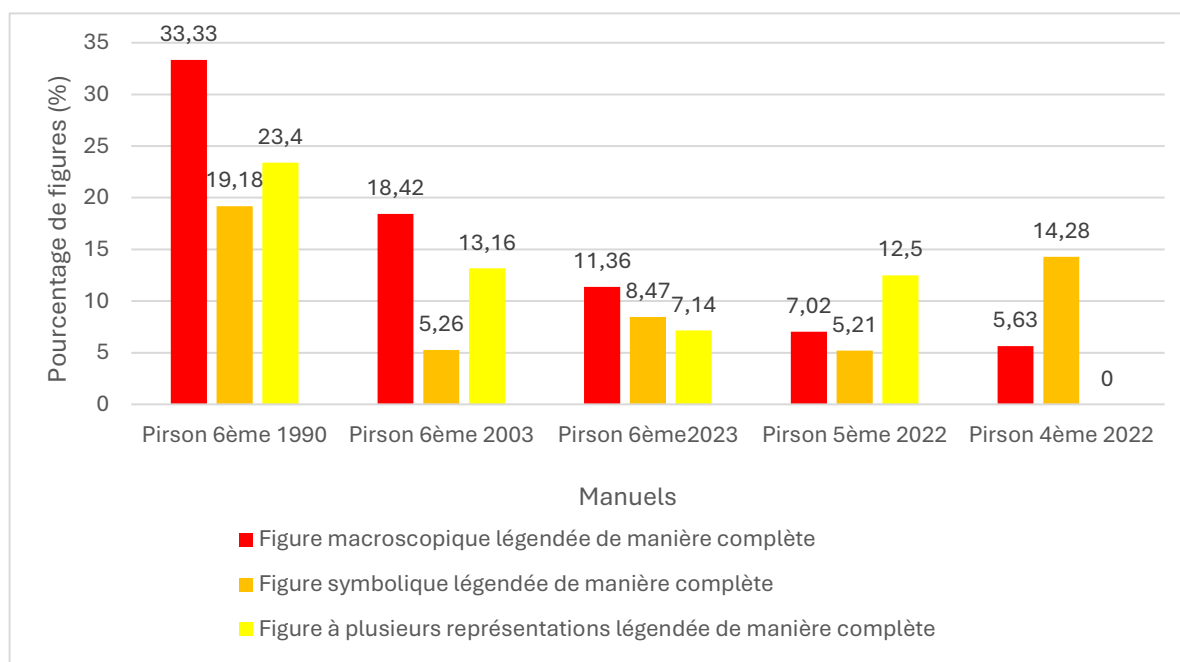


Figure 31 : Graphique du pourcentage de chaque type de figure en fonction du critère n°4 selon les différents manuels de secondaire belges

3.3) Résultats descriptifs de l'analyse des manuels français

Analysons à présent les résultats obtenus pour les manuels de l'enseignement secondaire français de manière approfondie, en structurant l'examen en trois sous-sections similaires à celles utilisées pour l'analyse des manuels belges. Un point essentiel à garder à l'esprit au cours de cette analyse est que les manuels français étudiés représentent une part très réduite de l'ensemble des ouvrages disponibles en France. Il est donc nécessaire d'éviter toute généralisation excessive. De plus, contrairement aux manuels belges de Pirson *et al*, où il est possible de comparer différentes éditions (année de publication ou année d'enseignement), cette comparaison est plus délicate pour les manuels français. En effet, au-delà des différences d'années, s'ajoutent également des variations dans les équipes d'auteurs.

3.3.1) Objectifs des figures

Abordons tout d'abord le sixième critère, qui porte sur les objectifs des figures. Les résultats relatifs à ce critère sont représentés dans le graphique ci-dessous (Figure 32). Il ressort, en premier lieu, que pour l'ensemble des manuels scolaires français, l'objectif consistant à accrocher l'attention des élèves, illustré en rouge, occupe une place prédominante. Les valeurs oscillent entre **22 %** (Villar, 1995) et **39 %** (Antczak, 2020). Ces données témoignent de la volonté marquée des auteurs de ces manuels de captiver l'intérêt des élèves dès les premières étapes de l'apprentissage. En revanche, le second objectif, représenté en orange, visant à donner une traduction visuelle d'une phrase au niveau expérimental, est nettement moins fréquent dans ces manuels français, avec des proportions variant de **2 %** (Antczak, 2020) à **6 %** (Villar, 1995). Ce constat met en évidence la faible utilisation de ce type d'objectif dans les figures des manuels étudiés. Le troisième objectif, qui consiste à schématiser dans une visée explicative, représenté

en jaune, est davantage présent. Par exemple, le manuel de *Villar (1995)* affiche une proportion de **22 %** tandis que le manuel d'*Arer (2019)* en présente **18 %**. Cependant, cette proportion est significativement réduite dans le manuel d'*Antczak (2020)*, où elle atteint seulement **7 %**. Cette disparité peut être attribuée aux approches divergentes des auteurs, qui traduisent des conceptions différentes quant à l'utilité des figures pédagogiques. Le quatrième objectif, destiné à mettre en évidence les relations même partielles entre les niveaux macroscopique, submicroscopique et symbolique, est très peu représenté dans les manuels analysés, avec des proportions allant de **0 %** (*Antczak, 2020*) à **2 %** (*Villar, 1995*). Ce constat suggère une attention limitée des auteurs à ce type d'objectif dans les représentations. Quant au cinquième objectif, qui vise à illustrer un montage expérimental ou une expérience (indiqué en bleu), il occupe une place notable, avec des valeurs comprises entre **9 %** (*Dulaurans, 2016*) et **23 %** (*Villar, 1995*). Cela reflète l'importance accordée par ces auteurs à ce type de figures, jugées manifestement essentielles pour l'apprentissage expérimental. Enfin, les sixième et septième objectifs, relatifs respectivement aux graphiques mathématiques (mauve) et aux tableaux de données (marron), sont également bien représentés. Par exemple, le manuel de *Villar (1995)* intègre **25 %** de ces figures, tandis que celui de *Dulaurans (2016)* en contient **40 %**. Ces observations permettent donc de conclure que les manuels étudiés mobilisent une diversité d'objectifs pour leurs figures, mais certains ressortent comme prioritaires. Ces derniers incluent : capter l'attention des élèves, proposer des schémas explicatifs, illustrer des montages expérimentaux et intégrer des graphiques ou tableaux de données. Ces choix reflètent les orientations pédagogiques privilégiées par les auteurs. Comme dans les manuels belges, les relations entre les niveaux macroscopique, submicroscopique et symboliques sont très peu représentées.

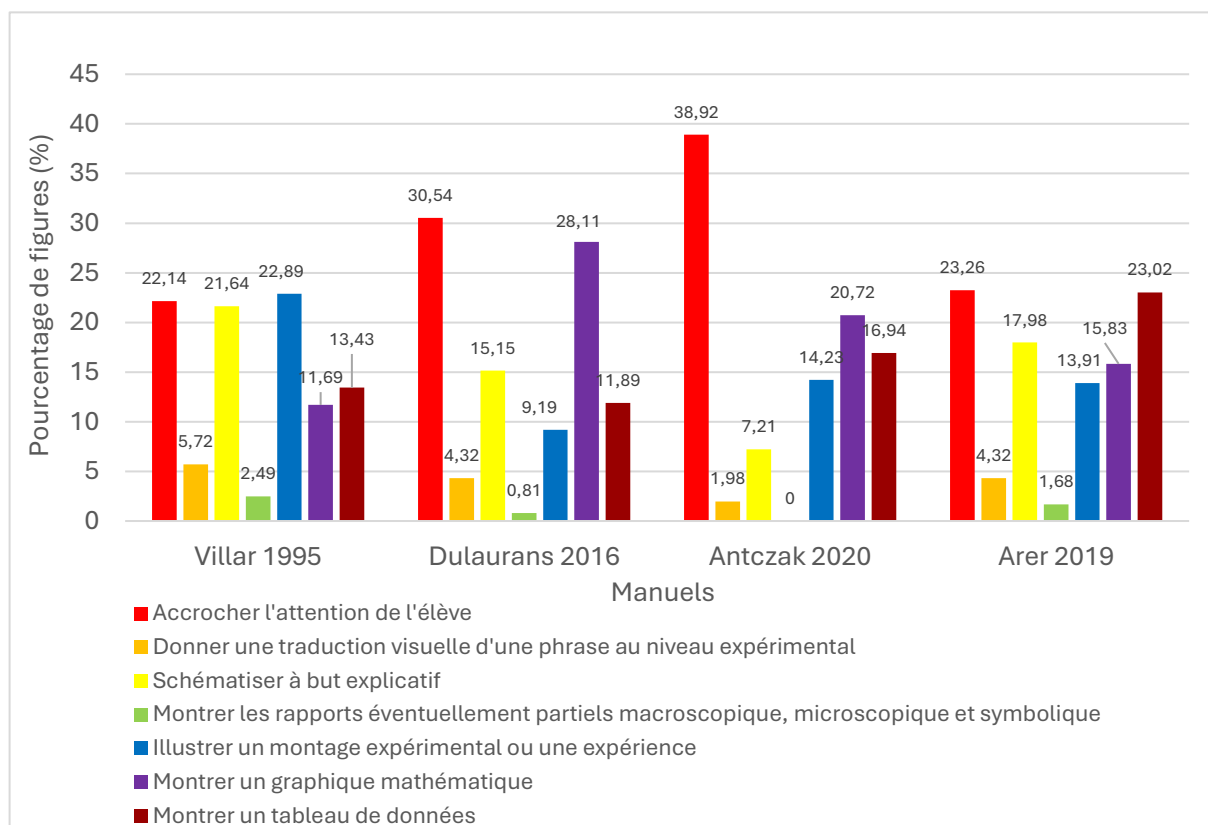


Figure 32 : Graphique du nombre de figure en fonction du critère n°6 selon les différents manuels de secondaire français.

3.3.2) Connexion macroscopique-submicroscopique-symbolique

Pour introduire cette section consacrée à la connexion entre les niveaux macroscopique, submicroscopique et symbolique, nous allons tout d’abord observer les résultats obtenus pour le premier critère, relatif aux types de figures présentes dans les manuels scolaires français. Ces résultats sont illustrés dans la figure 33 ci-dessous. Il apparaît, en premier lieu, que ces manuels contiennent une forte proportion de figures de type macroscopique. Les données révèlent des valeurs comprises entre **43 %** dans le manuel d’*Arer (2019)* et **54 %** dans celui d’*Antczak (2020)*. Concernant les figures de type symbolique, on observe des proportions comparables à celles des figures macroscopiques. À titre d’exemple, les manuels présentent des pourcentages oscillants entre **41 %** (*Villar, 1995*) et **45 %** (*Arer, 2019*). Ces résultats mettent en lumière l’importance accordée par les auteurs à l’intégration de figures de ces deux types, jugées essentielles pour l’apprentissage. En revanche, les figures de type submicroscopique sont extrêmement rares dans les manuels étudiés, avec des proportions variant entre **3 %** (*Antczak, 2020*) et **8 %** (*Dulaurans, 2016*). Ces chiffres traduisent une faible considération pour ce type de représentation, en contraste net avec la prépondérance des figures macroscopiques et symboliques. Quant aux figures combinant plusieurs niveaux de représentation, elles sont également très peu présentes. Les proportions relevées sont de **2 %** dans les manuels de *Dulaurans (2016)* et d’*Antczak (2020)*, et de **3 %** dans ceux de *Villar (1995)* et d’*Arer (2019)*. Ces données soulignent le désintérêt des auteurs pour ce type de figures, qui articulent les niveaux macroscopique, submicroscopique et symbolique. Cette tendance reflète probablement des choix pédagogiques des auteurs centrés sur les niveaux macroscopique et symbolique, au détriment des niveaux submicroscopiques ou d’une association de ces niveaux.

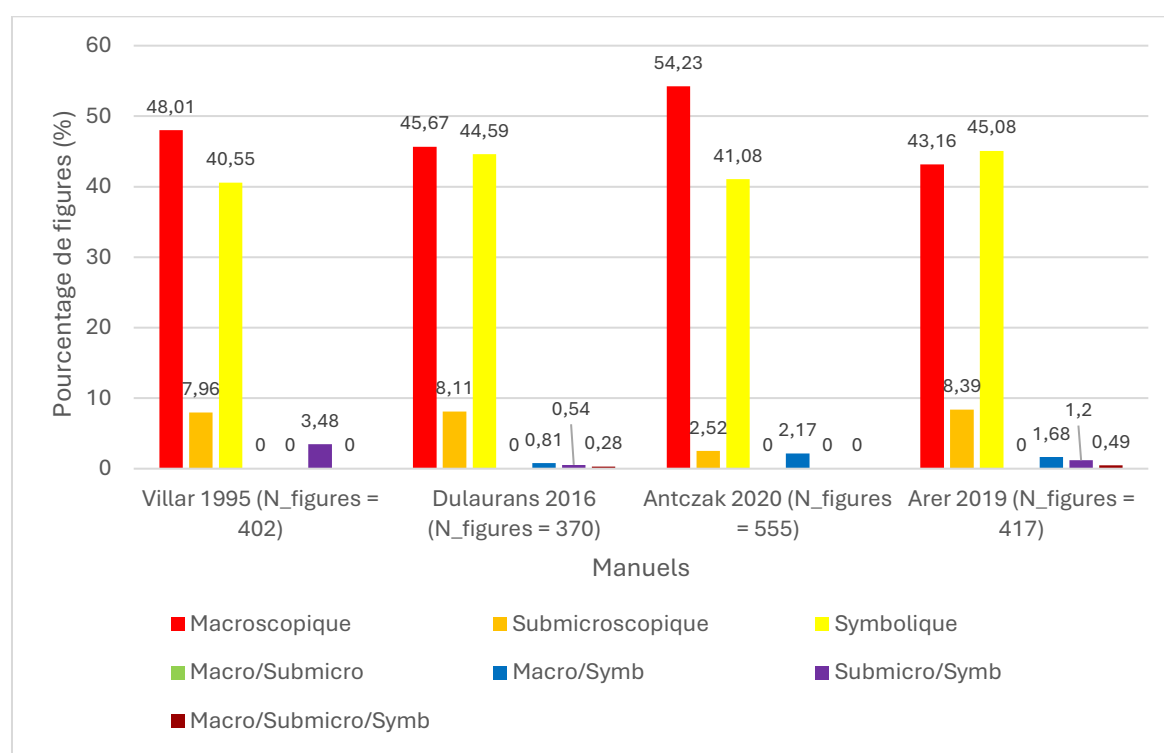


Figure 33 : Graphique du pourcentage de chaque type de représentation en fonction des différents manuels de secondaire français.

Après avoir identifié les types de figures les plus fréquemment présentes dans les manuels scolaires français, nous allons à présent analyser le degré de corrélation entre les figures regroupant plusieurs niveaux de représentation, à savoir les figures de type multiple, hybride et mixte. Avant de procéder à cette analyse, et à l'instar de ce qui a été fait pour les manuels de secondaire belges, nous déterminerons le nombre de ces figures dans les manuels à l'aide de l'examen du critère n°1. Les résultats correspondants sont présentés dans la figure 34 ci-dessous. Il apparaît que seules les figures de types multiples et hybrides sont présentes dans ces manuels, aucune figure de type mixte n'ayant été relevée. Toutefois, les proportions des figures multiples et hybrides varient considérablement en fonction des auteurs. Par exemple, les manuels de *Villar (1995)* et d'*Antczak (2020)* se distinguent par une prédominance des figures hybrides, avec des pourcentages respectifs de **71 %** et **83 %**. À l'inverse, les manuels de *Dulaurans (2016)* et d'*Arer (2019)* privilégient les figures multiples, atteignant des valeurs de **79 %** (*Arer, 2019*) et **83 %** (*Dulaurans, 2016*). Ces observations mettent en évidence une nette variabilité dans le choix d'intégrer des figures multiples ou hybrides, ce choix semblant directement lié aux orientations pédagogiques des auteurs. Ces derniers privilégient l'un ou l'autre type de figure en fonction de leur vision de la transmission des connaissances et des interactions entre les différents niveaux de représentation.

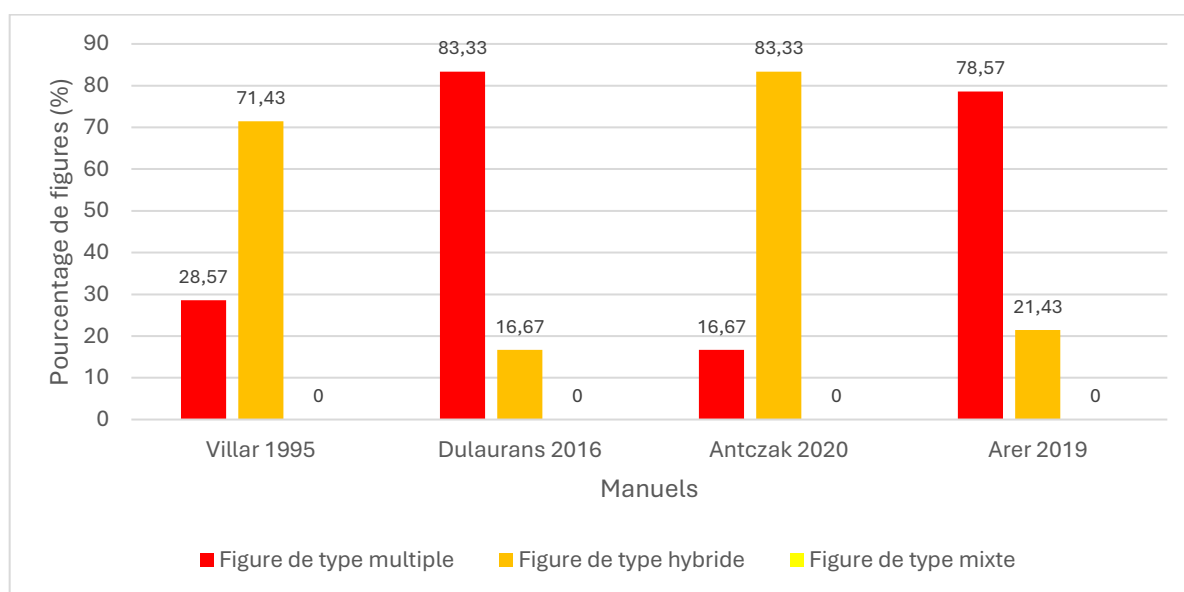


Figure 34 : Graphique du pourcentage de figure multiple, hybride et mixte dans les différents manuels de secondaire français.

Après avoir identifié les pourcentages des figures de type multiple, hybride et mixte, nous pouvons désormais examiner leur degré de corrélation au sein des manuels scolaires français analysés. Les résultats correspondants sont illustrés dans la figure 35 ci-dessous. L'analyse révèle que l'ensemble des figures intégrant plusieurs niveaux de représentation manifeste une connexion systématiquement adéquate entre les différents types de représentation qu'elles englobent. Ce constat met en lumière que, malgré leur faible proportion dans les manuels français étudiés, ces figures se distinguent par leur cohérence et leur solidité conceptuelle. Ainsi, bien que leur fréquence soit limitée, leur intégration dans les manuels semble répondre à une logique rigoureuse, garantissant leur pertinence dans le cadre des objectifs pédagogiques poursuivis.

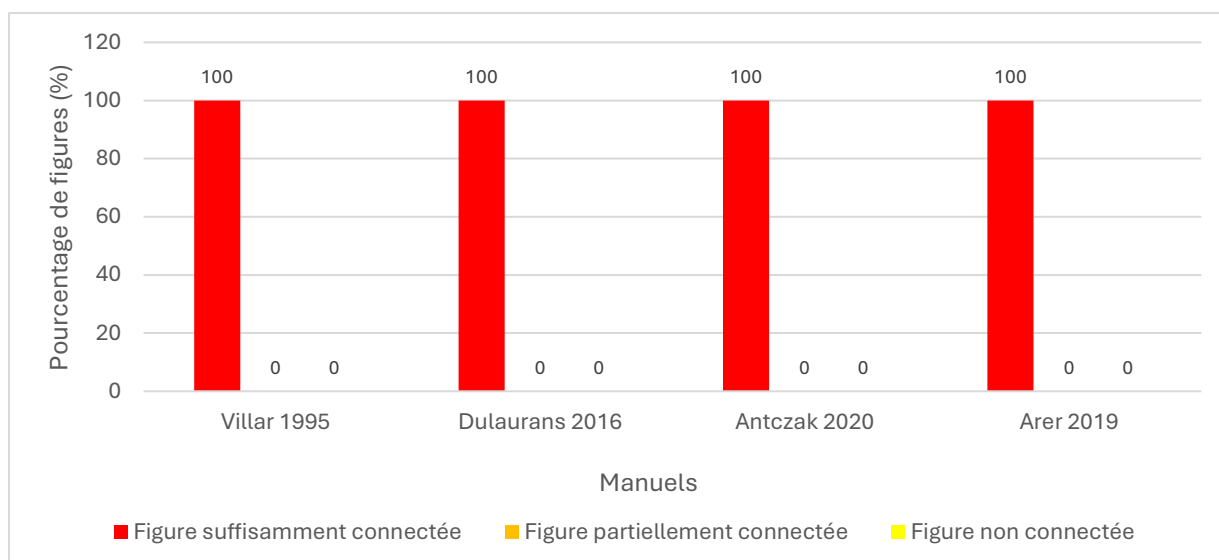


Figure 35 : Graphique du pourcentage de figure en fonction du critère n°5 selon les différents manuels de secondaire français.

3.3.3) Qualité des figures

Pour introduire cette section dédiée à la qualité des figures présentes dans les manuels scolaires du secondaire français, nous débiterons par l'examen du critère n°2, relatif à l'étiquetage des figures. Une observation essentielle émerge de cette analyse : les manuels français étudiés affichent des proportions relativement similaires de figures non étiquetées. À titre d'exemple, le manuel de *Villar (1995)* présente **50 %** de figures non étiquetées, tandis que celui de *Dulaurans (2016)* en affiche **59 %**. Une exception notable est le manuel d'*Arer (2019)*, qui se distingue par une proportion plus faible, atteignant **36 %**. Ces résultats mettent en lumière une tendance générale : les figures analysées dans ces manuels présentent un pourcentage notablement élevé de figures non étiquetées, dépassant, dans la majorité des cas, la moitié des figures examinées. (Figure 36)

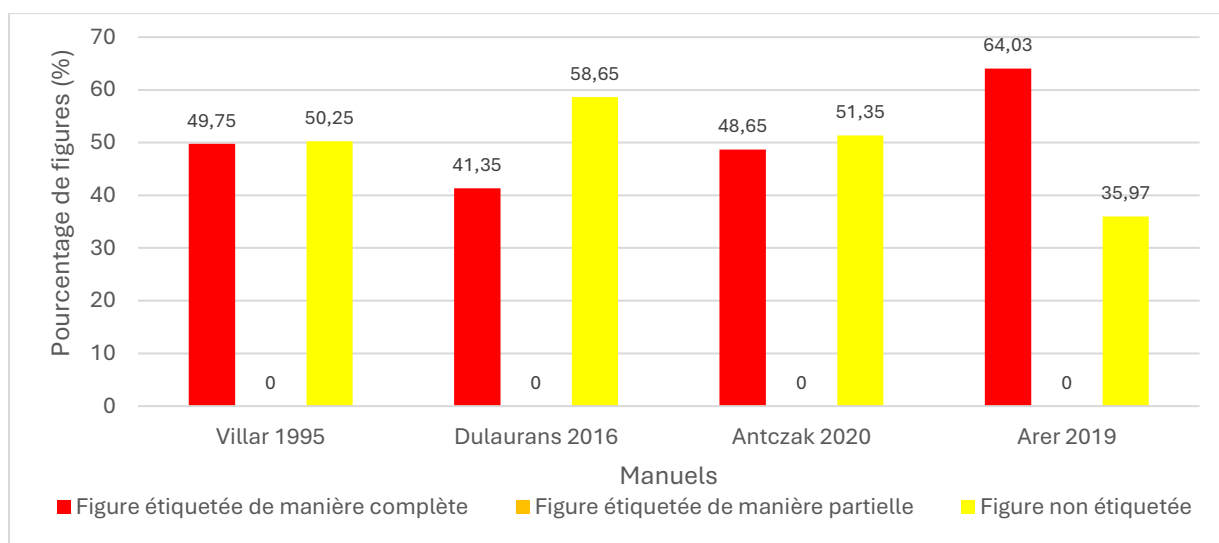


Figure 36 : Graphique du pourcentage de figure en fonction du type d'étiquetage selon les différents manuels de secondaire français.

En regardant plus en détails le critère relatif à l'étiquetage des figures (Figure 37), plusieurs observations émergent. Premièrement, pour l'ensemble des manuels de secondaire français, les figures de type macroscopique sont, en général, peu correctement étiquetées. Par exemple, les pourcentages relevés varient de **18 %** dans le manuel de *Villar (1995)* à **28 %** dans celui d'*Arer (2019)*. Une tendance similaire est observée pour les figures de type submicroscopique, avec des proportions allant de **3 %** dans le manuel de *Dulaurans (2016)* à **29 %** dans celui d'*Antczak (2020)*. Seul le manuel d'*Arer (2019)* se démarque avec un pourcentage notablement plus élevé, atteignant **49 %** de figures submicroscopiques correctement étiquetées. En revanche, les figures de type symbolique se distinguent par des taux élevés d'étiquetage correct dans l'ensemble des manuels analysés. Par exemple, les pourcentages varient de **82 %** (*Dulaurans, 2016*) à **99 %** (*Arer, 2019*). Une tendance comparable est observée pour les figures intégrant plusieurs niveaux de représentation, avec des proportions comprises entre **86 %** (*Villar, 1995*) et **92 %** (*Antczak, 2020*). Une exception notable est le manuel de *Dulaurans (2016)*, qui présente un pourcentage relativement faible, avec seulement **17 %** de figures correctement étiquetées à plusieurs niveaux de représentation. Ces résultats mettent en lumière une nette préférence des auteurs pour un étiquetage rigoureux des figures de type symbolique ainsi que de celles regroupant plusieurs niveaux de représentation, au détriment des figures macroscopiques et submicroscopiques.

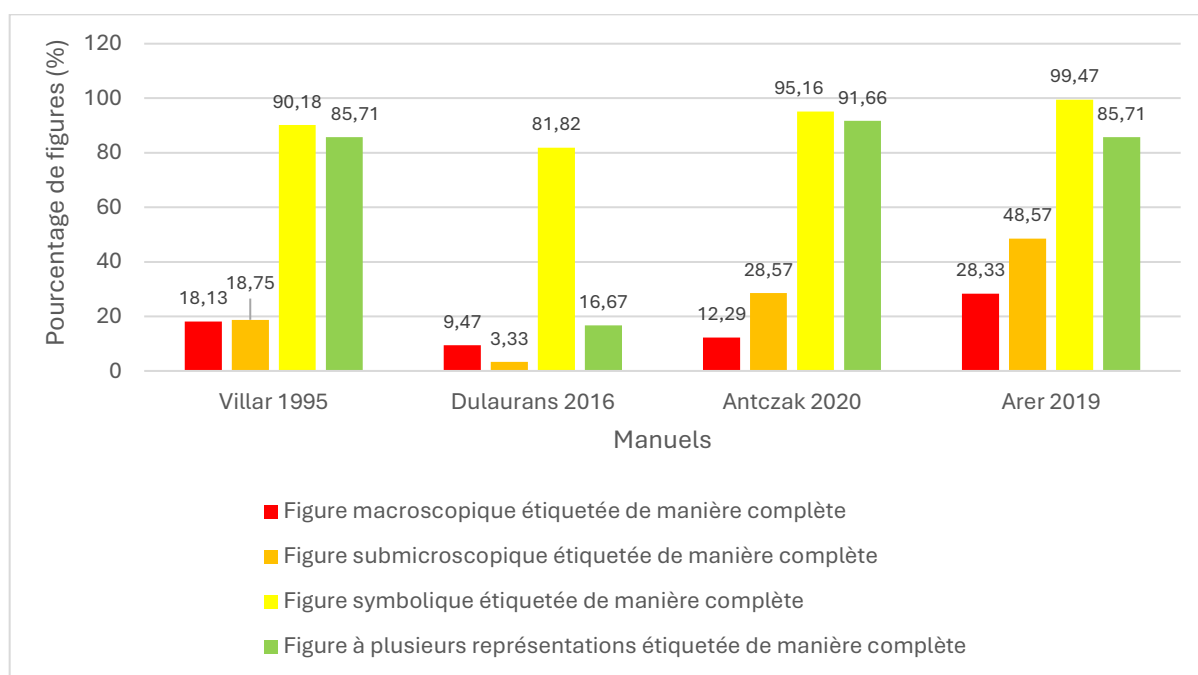


Figure 37 : Graphique du pourcentage de chaque type de figure en fonction du type d'étiquetage selon les différents manuels de secondaire français.

Abordons à présent le troisième critère relatif à la fois au lien entre le texte et les figures présentes dans les manuels, ainsi qu'à la mention explicite de ces figures dans le texte (Figure 38). Une observation majeure émerge de cette analyse : dans l'ensemble des manuels de niveau secondaire français étudiés, les figures sont presque systématiquement reliées au texte. Les proportions relevées oscillent entre **97 %** (*Villar, 1995 ; Dulaurans, 2016 ; Arer, 2019*) et **98 %** (*Antczak, 2020*). Ce constat témoigne de l'attention particulière portée par les auteurs à établir une connexion cohérente entre les figures sélectionnées et le contenu textuel des manuels.

Cependant, la situation est bien différente lorsqu'il s'agit de la mention explicite des figures dans le texte. Pour les manuels d'*Antczak (2020)* et d'*Arer (2019)*, une proportion importante de figures non mentionnées est observée, atteignant respectivement **63 %** et **72 %**. À l'inverse, les manuels de *Villar (1995)* et de *Dulaurans (2016)* présentent des taux plus faibles de figures non mentionnées, avec des valeurs de **41 %** et **36 %**. Ces résultats révèlent que cette variabilité dans la mention explicite des figures dépend largement des choix pédagogiques opérés par les auteurs. Toutefois, il convient de noter que le pourcentage de figures non mentionnées demeure relativement élevé dans l'ensemble des manuels analysés, ce qui pourrait soulever des interrogations quant à la lisibilité et à l'intégration optimale de ces figures dans le contenu pédagogique.

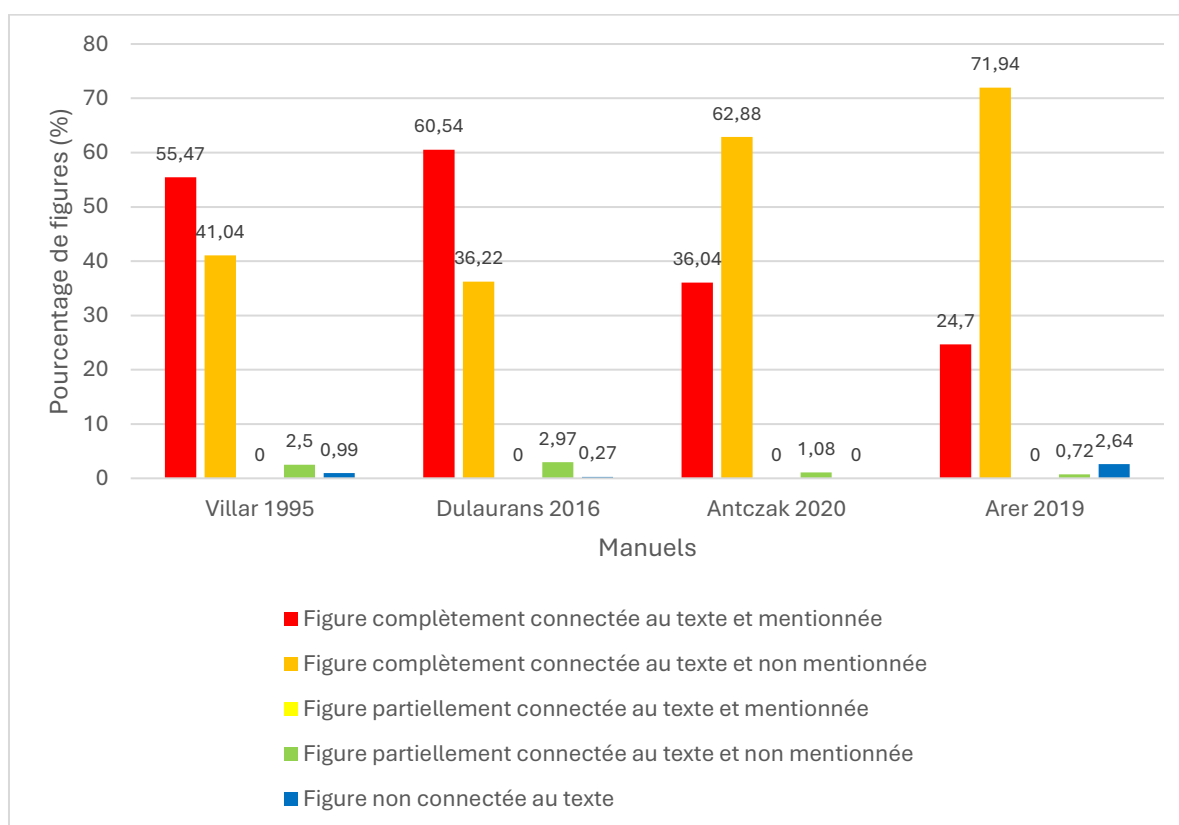


Figure 38 : Graphique du pourcentage de figure en fonction du critère n°3 selon les différents manuels de secondaire français.

Si l'on regarde plus en détails les résultats associés au critère n°3 à l'aide de la figure 39, plusieurs observations se dégagent. Tout d'abord, une observation majeure réside dans le relativement faible pourcentage de figures macroscopiques mentionnées dans le texte des manuels français étudiés. Les proportions varient toutefois assez fortement, entre **14 %** dans le manuel d'*Arer (2019)* et **46 %** dans celui de *Dulaurans (2016)*. En ce qui concerne les figures submicroscopiques, les pourcentages de figures mentionnées dans le texte sont globalement plus élevés que ceux des figures macroscopiques. Par exemple, ces proportions vont de **37 %** (*Arer, 2019*) à **69 %** (*Villar, 1995*), avec également une grande variabilité : le manuel de *Dulaurans (2016)* ne mentionne aucune figure submicroscopique dans le texte (**0 %**). Pour les figures de type symbolique, les pourcentages sont généralement également supérieurs à ceux des figures macroscopiques. Ainsi, on observe **85 %** de figures symboliques mentionnées dans

le manuel de *Dulaurans (2016)* et **70 %** dans celui de *Villar (1995)*. En revanche, des proportions plus modestes sont relevées dans les manuels d'*Antczak (2020)* (**47 %**) et d'*Arer (2019)* (**32 %**). Concernant les figures à plusieurs niveaux de représentation, les résultats montrent une tendance similaire à celle des figures submicroscopiques et symboliques, avec des proportions élevées dans certains manuels. Par exemple, le manuel de *Villar (1995)* affiche **86 %**, tandis que celui de *Dulaurans (2016)* atteint **100 %**. À l'inverse, des valeurs plus modestes sont relevées pour les manuels d'*Arer (2019)* (**29 %**) et d'*Antczak (2020)* (**33 %**). Ces résultats mettent en évidence que, dans l'ensemble, les figures de type macroscopique sont nettement moins souvent mentionnées dans le texte que les autres types de figures. Toutefois, il est également important de noter qu'un nombre important de figures reste non mentionné dans le texte, quelle que soit leur catégorie, dans les manuels de niveau secondaire français étudiés.

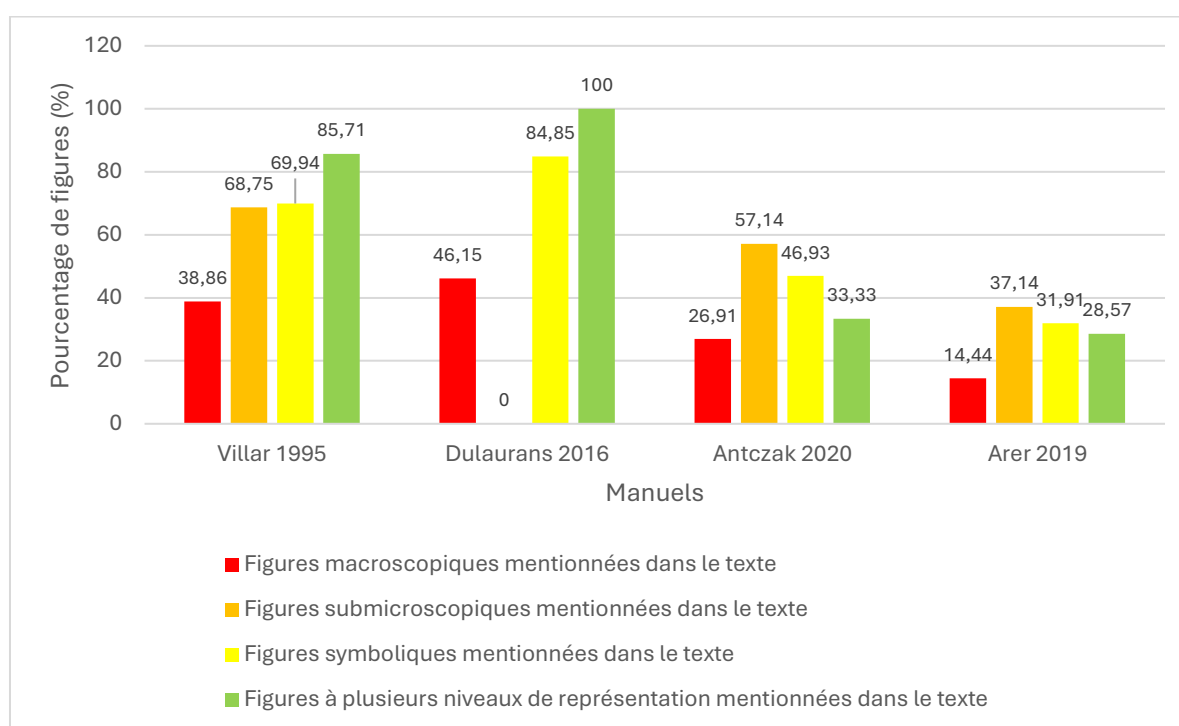


Figure 39 : Graphique du pourcentage de chaque type de figure en fonction du critère n°3 selon les différents manuels de secondaire français.

Le quatrième critère, relatif aux légendes et aux titres des figures, a été analysé, et les résultats sont présentés dans la figure 40 ci-dessous. Cette analyse met en lumière une observation majeure : un pourcentage important de figures dépourvues de légendes est présent dans l'ensemble des manuels de secondaire français étudiés. En effet, les proportions de figures sans légendes varient de **42 %** dans le manuel d'*Arer (2019)* à **51 %** dans celui de *Dulaurans (2016)*, atteignant même **63 %** dans le manuel d'*Antczak (2020)*. Cependant, le manuel de *Villar (1995)* se distingue par un pourcentage sensiblement plus faible de figures non légendées, avec une valeur de seulement **27 %**. Ces résultats soulèvent des interrogations quant à la lisibilité et à l'accessibilité pédagogique des figures dans ces manuels. L'absence de légendes peut en effet limiter la compréhension des élèves, en particulier lorsqu'ils tentent de relier les figures au contenu textuel ou aux concepts qu'elles illustrent.

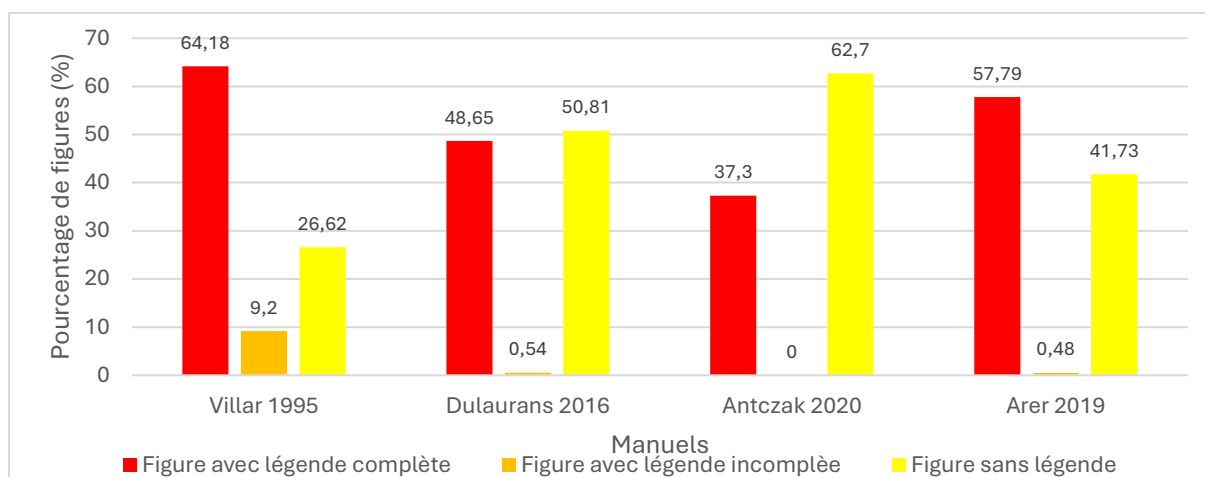


Figure 40 : Graphique du pourcentage de figure en fonction du critère n°4 selon les différents manuels de secondaire français.

En analysant plus en détail le critère n°4 à l'aide de la figure 41 ci-dessous, plusieurs points émergent. Tout d'abord, il est constaté que les figures de type macroscopique et symbolique présentent un pourcentage plus faible de légendes complètes par rapport aux figures de type submicroscopique et à plusieurs niveaux de représentation, dans les manuels de secondaire français étudiés. Ainsi, pour les figures macroscopiques, les pourcentages de figures avec légendes complètes varient de **42 %** (*Antczak, 2020*) à **77 %** (*Villar, 1995*), tandis que pour les figures symboliques, ces valeurs oscillent entre **29 %** (*Antczak, 2020*) et **65 %** (*Arer, 2019*). À l'inverse, les figures submicroscopiques présentent des valeurs plus élevées, allant de **64 %** (*Antczak, 2020*) à **78 %** (*Villar, 1995*), et les figures à plusieurs niveaux de représentation affichent des résultats encore plus marqués, avec des pourcentages variant de **42 %** (*Antczak, 2020*) à **100 %** (*Dulaurans, 2016*). Ce constat met en évidence une préférence des auteurs de ces manuels pour des légendes plus détaillées et complètes pour les figures de type submicroscopique et à plusieurs niveaux de représentation, au détriment des figures macroscopiques et symboliques.

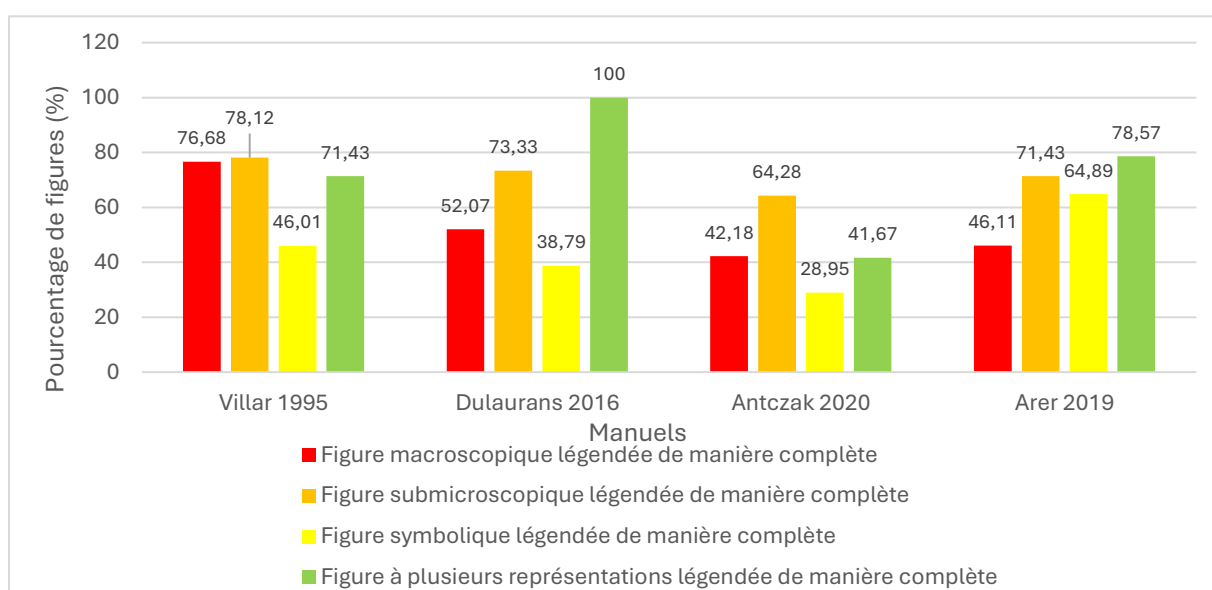


Figure 41 : Graphique du pourcentage de chaque type de figure en fonction du critère n°4 selon les différents manuels de secondaire français.

3.4) Discussion et interprétation des résultats

Un examen approfondi d'un échantillon de manuels belges et français destinés à l'enseignement secondaire, présenté dans les sections 3.2 et 3.3, permet de dégager plusieurs points importants même si le corpus étudié est limité à 9 ouvrages, 5 belges et 4 français.

Tout d'abord, une première observation importante de notre analyse porte sur la manière dont les manuels belges et français distribuent et priorisent les trois niveaux de représentation (macroscopique-submicroscopique-symbolique). Nous avons constaté une domination des représentations macroscopiques et symboliques dans l'ensemble des manuels étudiés. Les figures de type macroscopique, qu'il s'agisse de photos ou d'illustrations, permettent aux élèves d'appréhender les phénomènes à une échelle qu'ils peuvent directement observer. De leur côté, les figures symboliques facilitent la modélisation des phénomènes par des équations, des graphiques et des diagrammes renforçant la compréhension théorique des sciences. Cependant, la représentation submicroscopique, qui permet de rendre compte des phénomènes à une échelle atomique et moléculaire, apparaît beaucoup moins fréquemment. Cette omission est particulièrement marquante, car elle constitue un obstacle à une compréhension plus approfondie des phénomènes scientifiques, souvent réduits à un simple niveau macroscopique sans référence à leurs mécanismes sous-jacents. Les figures au niveau submicroscopique sont susceptibles de contribuer à la compréhension des concepts fondamentaux par les élèves or ces représentations sont souvent reléguées à une place secondaire dans les manuels belges et français.

Ensuite, une autre observation cruciale est la proportion très faible de figures à plusieurs niveaux de représentation. Les manuels, tant belges que français, font un usage limité des figures qui intègrent simultanément au moins deux de ces trois niveaux. Or, une telle intégration pourrait offrir une vision plus complète des phénomènes scientifiques. Par exemple, une figure combinant une illustration macroscopique, le langage symbolique et des représentations submicroscopiques permettrait aux élèves de comprendre les liens entre les phénomènes observables, les théories qui les expliquent et les processus sous-jacents à l'échelle atomique et moléculaire. Le manque de ces figures dans les manuels scolaires du secondaire souligne une lacune dans la pédagogie, empêchant les élèves de mieux articuler ces niveaux et d'ainsi développer une vision plus intégrée des concepts scientifiques. Dans les manuels belges, on observe toutefois une fraction variant entre **10 %** et **30 %** de figures combinant les aspects macroscopiques et symboliques, alors que celles-ci sont extrêmement rares dans les 4 manuels français examinés.

Dans cette étude, nous avons également noté une variabilité importante de l'étiquetage des figures à travers les manuels belges et français. Les manuels récents, qu'ils soient belges ou français, comportent encore un nombre important de figures non étiquetées ou mal étiquetées. L'étiquetage des figures est essentiel, car il permet d'éviter toute ambiguïté et garantit que les élèves comprennent les éléments représentés et les relations entre eux. Une figure sans étiquette ou mal étiquetée peut conduire à des interprétations erronées et affaiblir la compréhension des concepts abordés. Si l'étiquetage des figures macroscopiques s'avère particulièrement

insuffisant dans les manuels, on note également un nettement meilleur étiquetage des figures symboliques et combinant plusieurs représentations. En outre, le lien entre les figures et le texte reste un élément clé de la compréhension des concepts scientifiques. Si les manuels ont généralement l'intention de relier les figures au contenu textuel, il est toutefois observé que cette connexion tend à se détériorer au fil du temps. En effet, dans les éditions les plus récentes, une part importante des figures n'est même pas mentionnée dans le texte. Les figures au niveau macroscopique sont souvent laissées sans explication détaillée, alors que celles de type symbolique bénéficient d'une mention plus fréquente dans les explications. Ce manque de liens explicites entre le texte et les figures peut engendrer une déconnexion entre les différents modes de représentations et gêner l'intégration des connaissances chez les étudiants.

De plus, l'analyse des objectifs des figures dans les manuels révèle des résultats globalement similaires pour les manuels belges et français. Les figures destinées à capter l'attention des élèves ont connu une augmentation notable dans les éditions récentes. Cela témoigne d'un effort accru pour rendre les manuels plus attractifs et visuellement engageants. Cependant, cette approche visuelle est parfois trop simplifiée et ne permet pas toujours une compréhension approfondie des phénomènes scientifiques. D'autre part, les figures destinées à illustrer les relations entre les niveaux macroscopique, submicroscopique et symbolique restent rares, malgré leur importance pour le développement d'une compréhension globale des concepts. Cette rareté révèle une certaine faiblesse dans la pédagogie des manuels, qui privilégient davantage la visualisation individuelle des phénomènes, mais négligent l'interconnexion nécessaire entre les différents niveaux d'observation et d'analyse.

Enfin, les manuels belges et français montrent des similitudes notables dans leur approche de l'intégration des trois niveaux de représentation. Toutefois, certaines différences existent, notamment dans la répartition des types de figures et dans l'intensité de l'étiquetage. Les deux manuels français analysés offrent un plus grand nombre de figures symboliques que leurs homologues belges des années 2020, tandis que les manuels belges montrent une évolution temporelle privilégiant davantage les représentations macroscopiques. En termes d'étiquetage, les manuels belges les plus anciens affichaient des tendances plus positives. Les manuels français actuels sont mieux étiquetés que les ouvrages belges récents. Au niveau de la connexion des figures et du texte et de leur mention dans le texte, les manuels français présentent de plus grandes fluctuations que leurs homologues belges et des performances légèrement meilleures. Toutefois, aucun des deux systèmes ne semble parvenir à une intégration cohérente et fluide des trois niveaux de représentation de manière systématique dans la construction des savoirs.

Au regard de cette analyse, il est clair que les manuels de secondaire français et belges de notre échantillon ne parviennent pas à mobiliser de manière optimale les trois niveaux de représentation pour favoriser une compréhension complète des phénomènes scientifiques. La prédominance des figures macroscopiques et symboliques, le manque de figures à plusieurs niveaux de représentation et l'insuffisance d'étiquetage et de légendage des figures montrent que les manuels actuels restent fragmentés dans leur approche pédagogique. Les élèves, bien que parfois exposés à des représentations à plusieurs niveaux de représentation, sont rarement encouragés à établir des liens explicites et clairs entre ces différentes échelles de représentations.

Chapitre 4 :

Les ouvrages de chimie de l'enseignement supérieur

4.1) Choix des traités

Pour réaliser cette analyse des traités de l'enseignement supérieur, nous avons sélectionné plusieurs ouvrages différents. Nous avons sélectionné 5 traités destinés à une première année universitaire dont un de 2007, un de 2008, un de 2017 et deux de 2019. Cette sélection a été opérée afin de pouvoir comparer les ouvrages au fil du temps mais également entre différents auteurs. Voici la liste des ouvrages analysés :

- Arnaud, P., Rouquérol, F., Chambaud, G., & Lissillour, R. (2007). *Chimie Physique* (6ème éd.). Dunod.
- Chang, R., & Overby, J. (2019). *Chimie des solutions* (5ème éd.). De Boeck Supérieur.
- Chang, R., & Overby, J. (2019). *Chimie générale* (5ème éd.). De Boeck Supérieur.
- Hill, J., Petrucci, R., McCreary, T., & Perry, S. (2008). *Chimie des solutions* (4ème éd.). ERPI.
- Perrio, S., Roy, B., & Winum, J.-Y. (2017). *Chimie*. Dunod.

4.2) Résultats descriptifs de l'analyse

Examinons à présent les résultats obtenus pour les traités de l'enseignement supérieur choisis dans la section 4.1. L'ensemble des analyses effectuées est consigné dans l'annexe 7. À l'issue de ce travail, plusieurs résultats quantitatifs ont été obtenus et présentés sous forme de tableaux dans l'annexe 10. Comme pour les manuels de secondaire belges et français, l'analyse de ces ouvrages sera divisée en trois sous-sections consacrées respectivement aux objectifs des figures, aux connexions entre les niveaux macroscopique, submicroscopique et symbolique et à la qualité des figures. Un point essentiel à garder à l'esprit au cours de cette analyse est que les ouvrages de l'enseignement supérieur étudiés représentent une part très réduite de l'ensemble des ouvrages disponible. Il est donc nécessaire d'éviter toute généralisation excessive.

4.2.1) Objectifs des figures

Pour introduire cette partie sur les objectifs des figures figurant dans les ouvrages de l'enseignement supérieur, nous nous appuyerons sur les résultats du critère n°6, illustrés par la figure 42 ci-dessous.

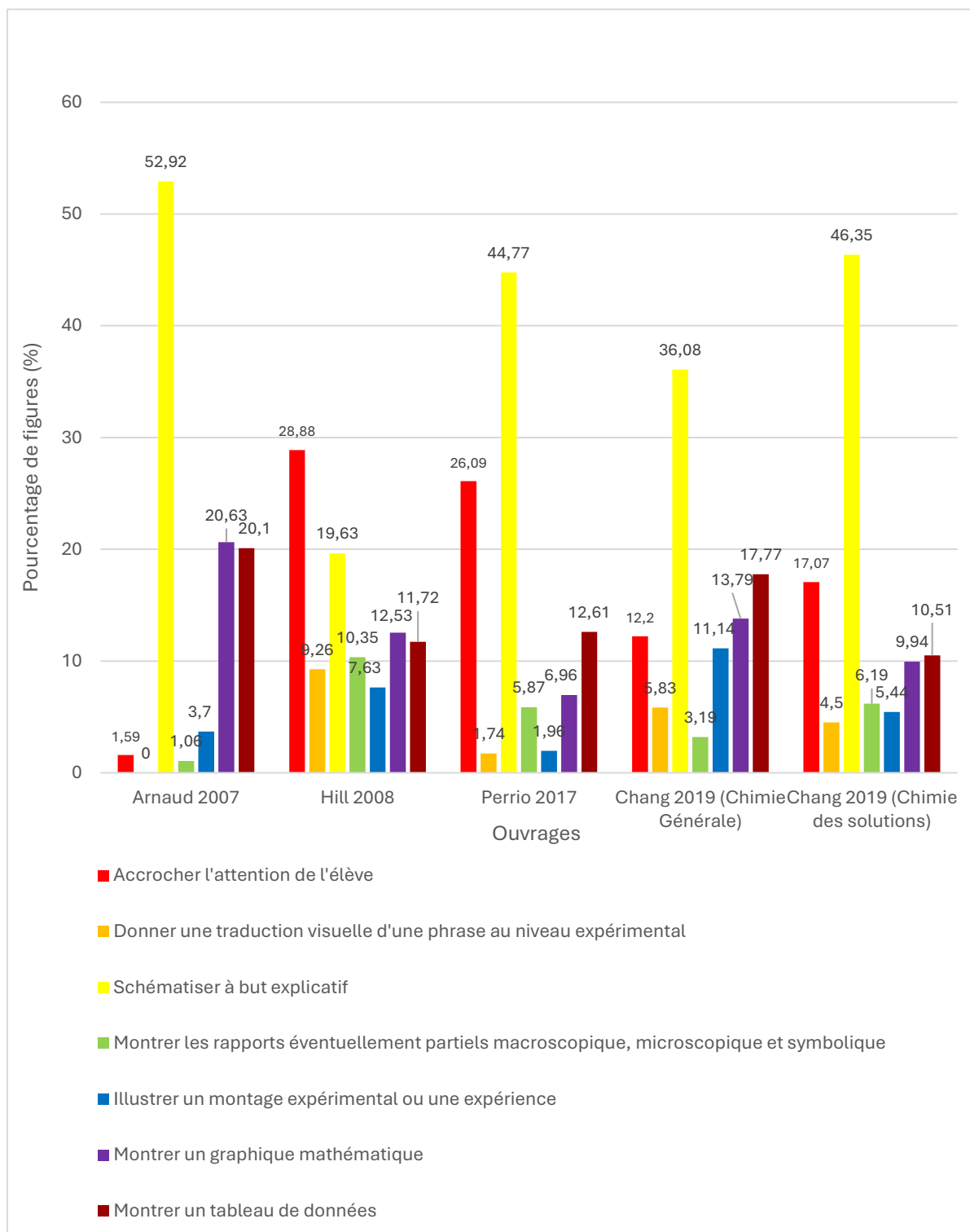


Figure 42 : Graphique du nombre de figure en fonction du critère n°6 selon les différents manuels de l'enseignement supérieur.

Tout d'abord, en ce qui concerne le premier objectif, qui consiste à capter l'attention des étudiants, les données révèlent des variations notables entre les différents traités étudiés. Les ouvrages de *Hill (2008)* et de *Perrio (2017)* affichent des pourcentages relativement élevés, respectivement de **29 %** et **26 %**. Les deux traités de *Chang (2019)* présentent également des valeurs élevées, avec **12 %** pour l'un et **17 %** pour l'autre. En revanche, le traité d'*Arnaud (2007)* se distingue par un pourcentage bien plus faible de seulement **2 %**, traduisant une attention moindre accordée à cet objectif dans cet ouvrage. Le second objectif, visant à donner une traduction visuelle d'une phrase au niveau expérimental, est globalement peu représenté dans les ouvrages examinés. Les pourcentages observés oscillent entre **0 %** (*Arnaud, 2007*) et **6 %** (*Chang, 2019, Chimie générale*). Seul le traité de *Hill (2008)* dépasse légèrement cette tendance avec une valeur de **9 %**. Cette faible représentation témoigne d'une priorité réduite accordée à cet aspect dans l'ensemble des ouvrages étudiés. En revanche, le troisième objectif, qui consiste à schématiser dans un but explicatif, domine largement les représentations graphiques des ouvrages étudiés. Les pourcentages relevés s'échelonnent entre **36 %** (*Chang, 2019, Chimie générale*) et **52 %** (*Arnaud, 2007*), témoignant d'une importance centrale accordée à cet objectif. Toutefois, le traité *Hill (2008)* constitue une exception notable avec une proportion plus modeste de **20 %**, reflétant son orientation prédominante vers l'objectif de capter l'attention des étudiants. Le quatrième objectif, visant à illustrer les relations entre les niveaux macroscopique, submicroscopique et symbolique, est relativement peu représenté dans les ouvrages de l'échantillon. Les pourcentages varient entre **1 %** (*Arnaud, 2007*) et **10 %** (*Hill 2008*). Il est intéressant de noter une légère progression de cette représentation dans les ouvrages récents, traduisant un intérêt croissant pour cet aspect pédagogique. Le cinquième objectif, qui consiste à illustrer un montage expérimental ou une expérience, reste également sous-représenté, avec des proportions de figures s'étendant de **4 %** (*Arnaud, 2007*) à **11 %** (*Chang, 2019, Chimie générale*). Enfin, les sixième et septième objectifs cumulés présentent des valeurs nettement plus élevées dans l'ensemble des ouvrages étudiés, avec des proportions allant de **20 %** (*Perrio, 2017*) à **41 %** (*Arnaud, 2007*). En conclusion, il ressort de cette analyse que, pour la majorité des ouvrages de l'enseignement supérieur étudiés, l'objectif prioritaire demeure la schématisation à but explicatif, à l'exception notable du traité de *Hill (2008)*, qui se concentre principalement sur la captation de l'attention des étudiants.

4.2.2) Connexion macroscopique-submicroscopique-symbolique

Abordons à présent la connexion entre les niveaux macroscopique, submicroscopique et symbolique dans les figures des traités d'enseignement supérieur étudiés. À cette fin, nous analyserons les résultats relatifs au critère n°1, présentés dans la figure 43 ci-dessous. L'observation principale qui émerge de cette analyse est la forte prévalence des figures de type symbolique dans l'ensemble des ouvrages. Les pourcentages varient de **31 %** (*Hill, 2008*) à **74 %** (*Arnaud, 2007*), avec une prédominance notable dans ce dernier, qui consacre **74 %** de ses figures à ce type de représentation. En ce qui concerne les figures de type macroscopique, des pourcentages relativement élevés sont également observés, oscillant entre **27 %** (*Chang, 2019, Chimie des solutions*) et **44 %** (*Hill, 2008*) pour quatre des cinq traités. Cependant, le livre d'*Arnaud (2007)* se distingue par un pourcentage particulièrement faible de **3 %**, reflétant une attention limitée accordée aux figures de ce type. Pour les figures de type submicroscopique,

les pourcentages présentent une variabilité marquée selon les ouvrages. Des proportions faibles sont relevées, notamment dans les manuels de *Perrio (2017)* avec **1 %** et de *Hill (2008)* avec **4 %**. À l'inverse, des valeurs plus importantes apparaissent dans le manuel d'*Arnaud (2007)* avec **12 %** ainsi que dans les deux ouvrages de *Chang (2019)*, qui atteignent respectivement **17 %** et **19 %**. Enfin, les figures intégrant plusieurs (au moins deux) niveaux de représentation (macroscopique, submicroscopique et symbolique) sont modérément représentées dans les ouvrages étudiés. Les proportions relevées vont de **9 %** (*Perrio, 2017*) à **20 %** (*Hill, 2008*), traduisant une certaine considération pour ces figures complexes. Pour conclure, il apparaît que, dans la majorité des ouvrages examinés, les figures de type symbolique et macroscopique prédominent, à l'exception notable du manuel d'*Arnaud (2007)*, qui accorde une attention restreinte aux représentations macroscopiques. Par ailleurs, bien que moins fréquentes, les figures submicroscopiques et celles intégrant plusieurs niveaux de représentation occupent une place non négligeable, reflétant leur pertinence dans l'enseignement supérieur.

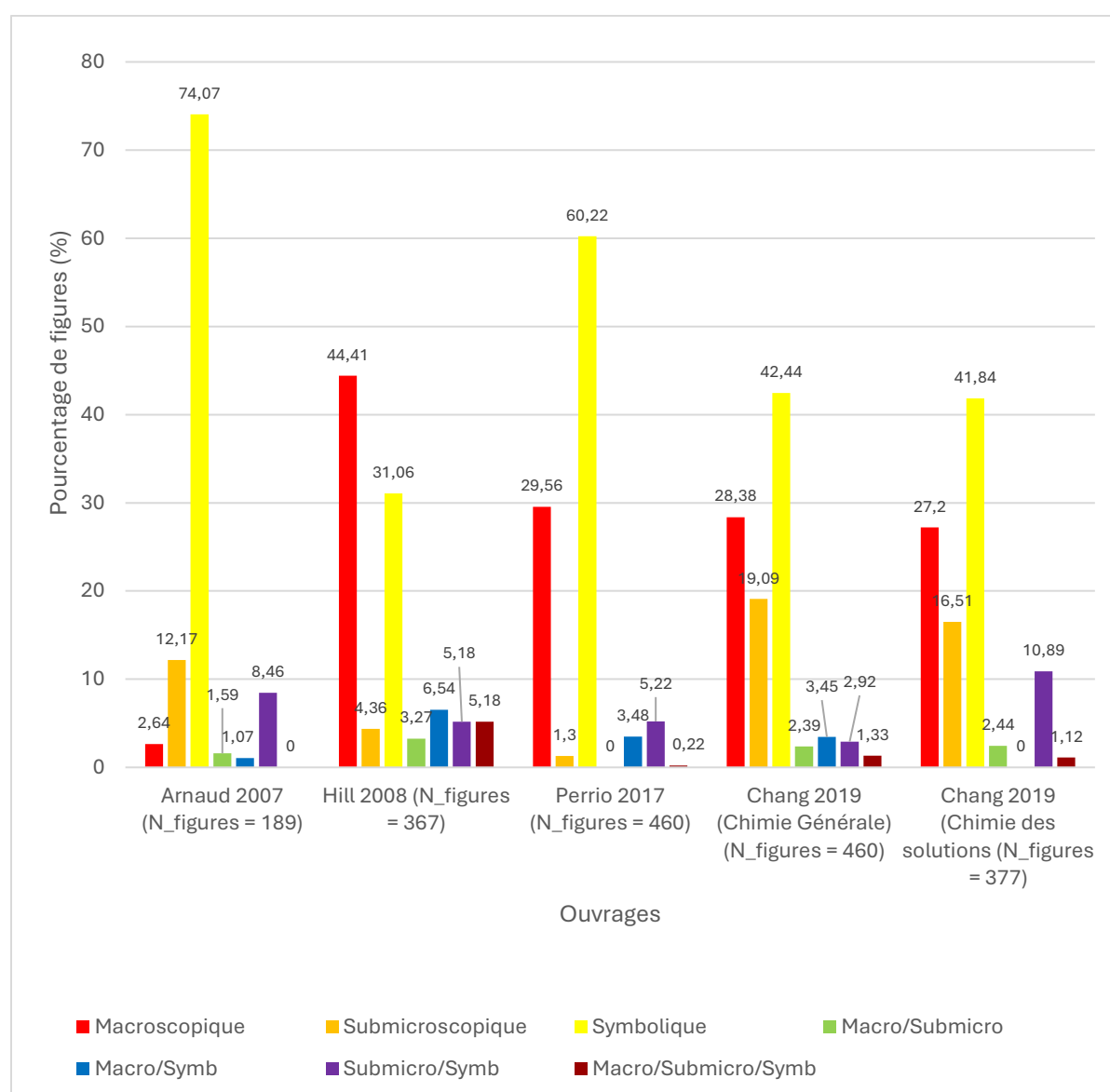


Figure 43 : Graphique du pourcentage de chaque type de représentation en fonction des différents 8manuels de l'enseignement supérieur.

Après avoir identifié les types de figures les plus fréquemment présentes dans les ouvrages de l'enseignement supérieur étudiés, nous allons désormais porter une attention particulière aux figures intégrant plusieurs niveaux de représentation, à savoir les figures de type multiple, hybride et mixte. Cette analyse s'appuie sur les données présentées dans la figure 44 ci-dessous. L'observation principale qui émerge de cette analyse est la grande variabilité des pourcentages de ces types de figures en fonction des ouvrages étudiés. Par exemple, les traités de *Perrio (2017)* et de *Chang (2019, Chimie des solutions)* se distinguent par une forte prévalence des figures de type multiple, représentant respectivement **88 %** et **81 %** de leurs représentations. À l'inverse, les manuels d'*Arnaud (2007)* et de *Chang (2019, Chimie générale)* privilégient davantage les figures de type hybride, avec des pourcentages élevés de **81 %** et **63 %** respectivement. Une situation particulière se présente dans l'ouvrage de *Hill (2008)*, qui affiche des proportions relativement équilibrées entre ces deux types de figures : **51 %** pour les figures multiples et **45 %** pour les figures hybrides. Quant aux figures de type mixte, elles sont généralement peu représentées dans l'ensemble des ouvrages analysés. Les pourcentages observés sont très faibles, oscillant entre **0 %** et **5 %**. Ces résultats mettent en lumière des divergences dans les choix pédagogiques des auteurs des ouvrages de l'enseignement supérieur. Chaque auteur semble adopter des orientations spécifiques en matière de représentation reflétant des approches différenciées selon les objectifs pédagogiques qu'il juge les plus appropriés.

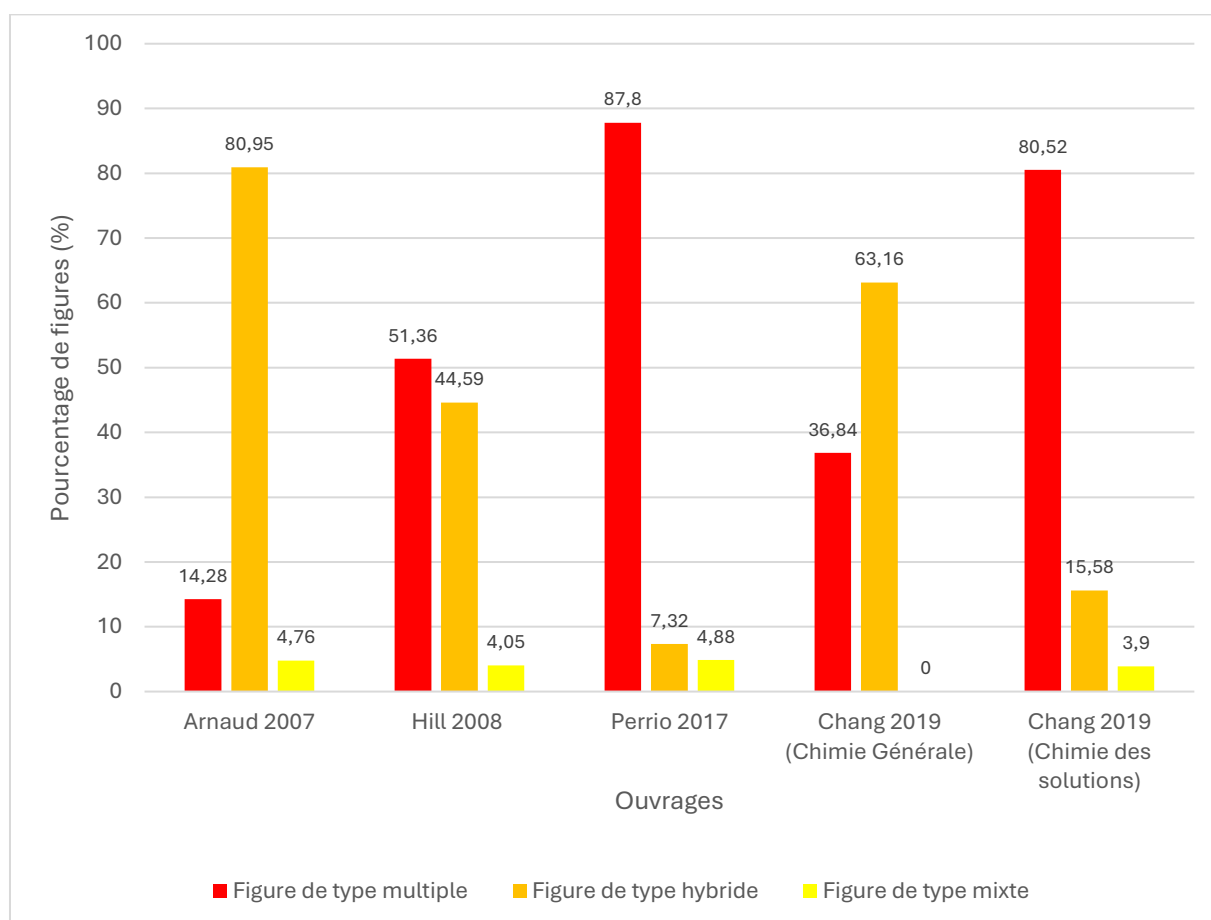


Figure 44 : Graphique du pourcentage de figure multiple, hybride et mixte dans les différents manuels de l'enseignement supérieur.

Après avoir identifié les pourcentages des figures de type multiple, hybride et mixte, nous nous intéressons désormais à leur degré de corrélation dans les différents ouvrages de l'enseignement supérieur analysés. Cette analyse repose sur les résultats obtenus pour le critère n°5, présentés dans la figure 45 ci-dessous. L'observation majeure qui se dégage est que les figures à plusieurs niveaux de représentation présentent un degré de corrélation très élevé entre les différents types de représentation qu'elles intègrent. Les pourcentages relevés dans cette analyse sont particulièrement élevés, oscillant entre **90 %** (Perrio, 2017) et **100 %** (Arnaud, 2007 ; Hill, 2008 ; Chang, 2019, *Chimie des solutions*). Ces données soulignent que ces figures sont presque systématiquement agencées de manière rigoureuse et cohérente, assurant une correspondance solide entre les différents niveaux de représentation qu'elles articulent.

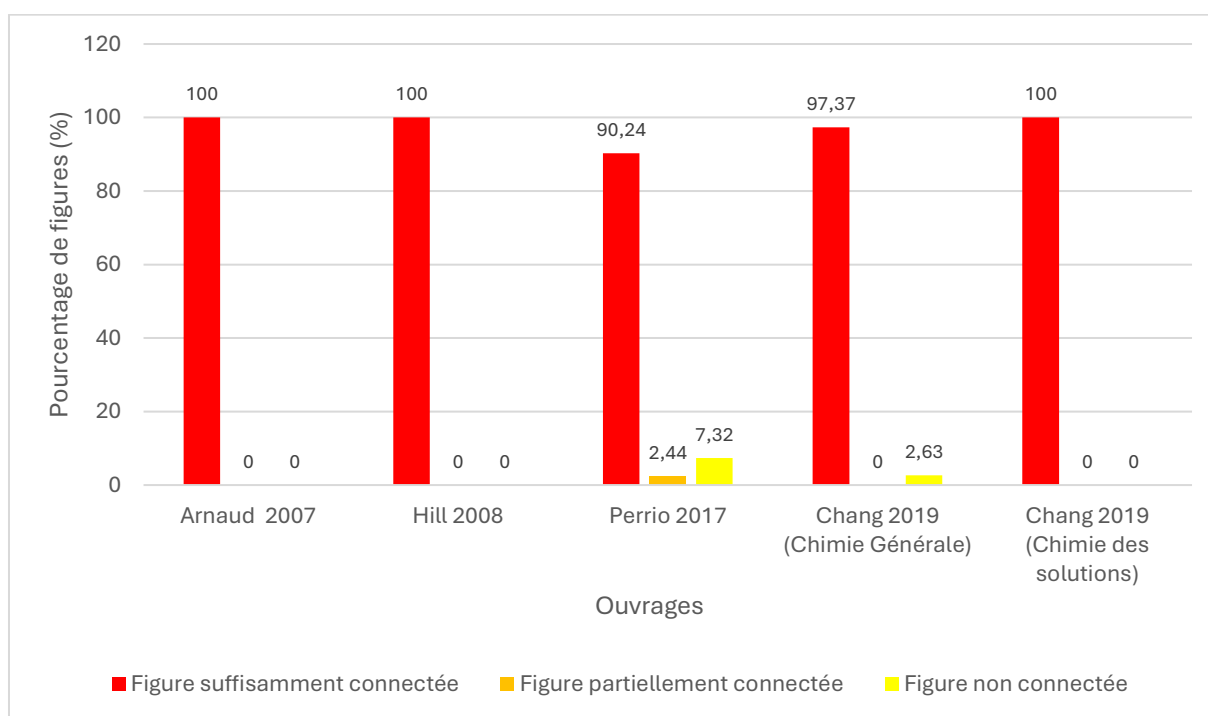


Figure 45 : Graphique du pourcentage de figure en fonction du critère n°5 selon les différents manuels de l'enseignement supérieur.

4.2.3) Qualité des figures

Après avoir analysé les objectifs des figures ainsi que leur connexion entre les niveaux macroscopique, submicroscopique et symbolique, nous nous intéressons à présent à la qualité des figures. Pour commencer, examinons les résultats obtenus pour le critère n°2, relatif à l'étiquetage des figures. Ces résultats sont synthétisés dans la figure 46 ci-dessous. Une tendance notable qui se dégage est le pourcentage encore relativement élevé de figures non étiquetées dans la majorité des ouvrages analysés. Les proportions relevées varient de **47 %** (Hill, 2008) à **57 %** (Perrio, 2017). Une exception significative est observée dans le manuel d'Arnaud (2007), qui se distingue par un pourcentage nettement inférieur de seulement **10 %** de figures non étiquetées. Ces résultats mettent en évidence un problème récurrent : un étiquetage insuffisant des figures dans les ouvrages étudiés, ce qui pourrait nuire à la compréhension des contenus par les étudiants.

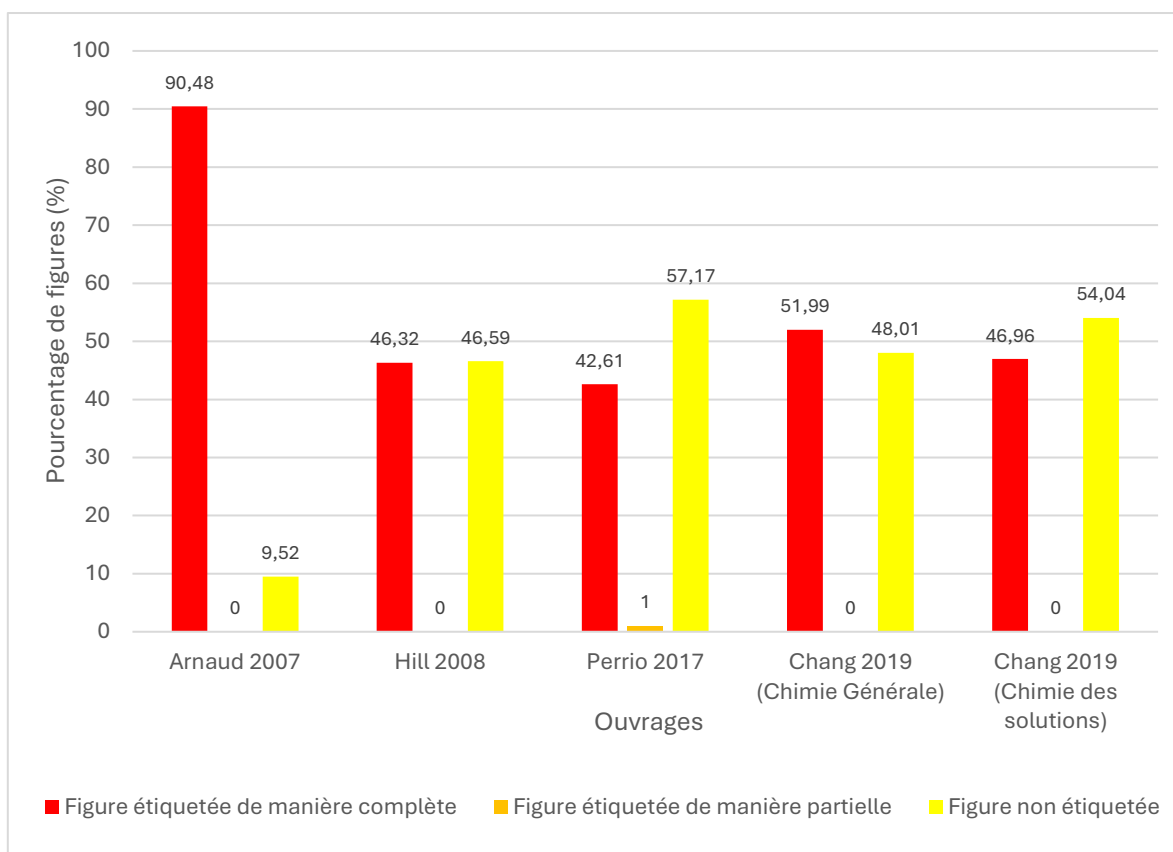


Figure 46 : Graphique du pourcentage de figure en fonction du type d'étiquetage selon les différents manuels de l'enseignement supérieur.

L'analyse détaillée des résultats obtenus pour le critère n°2, relatif à l'étiquetage des figures, révèle plusieurs observations importantes. Ces résultats sont illustrés dans la figure 47 ci-dessous. Tout d'abord, il apparaît que, dans les ouvrages d'enseignement supérieur étudiés, les figures de type macroscopique sont généralement étiquetées de manière moins satisfaisante. Les pourcentages relevés varient de **7 %** (*Hill, 2008*) à **18 %** (*Chang, 2019, Chimie des solutions*). Une exception notable est l'ouvrage d'*Arnaud (2007)*, qui se démarque par un pourcentage nettement supérieur, atteignant **40 %** de figures macroscopiques correctement étiquetées. Pour les figures de type submicroscopique, une tendance similaire est observée, avec des proportions allant de **6 %** (*Hill, 2008*) à **18 %** (*Chang, 2019, Chimie générale*). Là encore, le manuel d'*Arnaud (2007)* se distingue en affichant **52 %** de figures submicroscopiques correctement étiquetées, un résultat nettement supérieur à celui des autres ouvrages. En revanche, les figures de type symbolique présentent, dans l'ensemble, des pourcentages beaucoup plus élevés d'étiquetages corrects. Ces valeurs oscillent entre **58 %** (*Perrio, 2017*) et **98 %** (*Hill, 2008*), traduisant une attention accrue portée à l'étiquetage de ce type de figures. Une observation similaire s'applique aux figures à plusieurs niveaux de représentation, pour lesquelles les pourcentages varient de **51 %** (*Perrio, 2017*) à **95 %** (*Arnaud, 2007*). Ainsi, il apparaît que les figures de type symbolique et celles à plusieurs niveaux de représentation bénéficient généralement d'un étiquetage plus rigoureux dans les ouvrages étudiés, en comparaison avec les figures de type macroscopique et submicroscopique. Par ailleurs, le traité d'*Arnaud (2007)* se distingue une fois de plus en offrant un étiquetage des figures de meilleure qualité que celui observé dans les autres ouvrages étudiés.

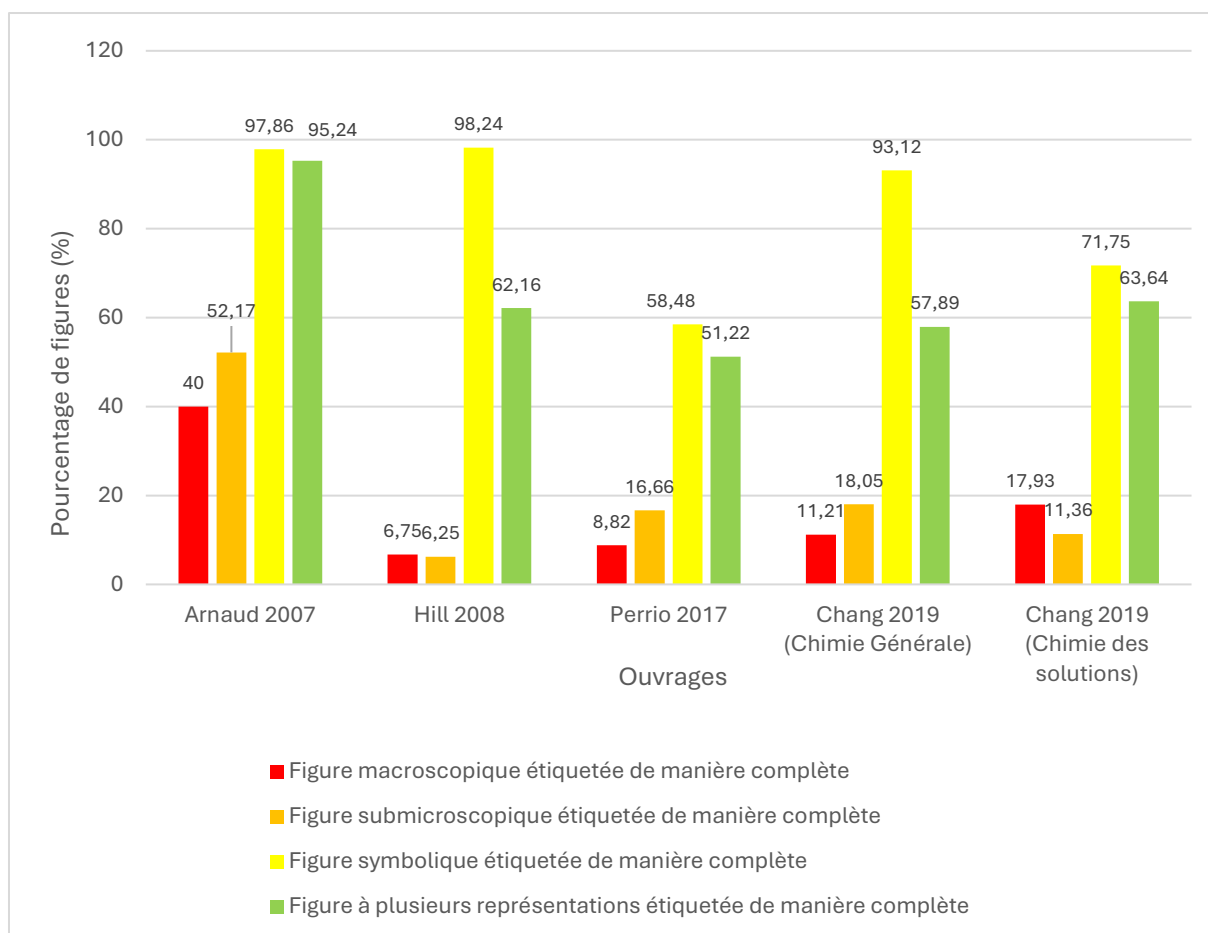


Figure 47 : Graphique du pourcentage de chaque type de figure en fonction du type d'étiquetage selon les différents manuels de l'enseignement supérieur.

Après avoir examiné les résultats relatifs à l'étiquetage des figures, nous nous intéressons à présent aux données obtenues pour le critère n°3. Ce critère porte sur deux aspects : le lien entre le texte et les figures présentes dans les traités, ainsi que la mention explicite de ces figures dans le texte. Les résultats de cette analyse sont synthétisés dans la figure 48 ci-dessous. Concernant la connexion entre les figures et le texte, il apparaît que, dans l'ensemble des ouvrages de l'enseignement supérieur étudiés, toutes les figures sont parfaitement reliées au texte. En effet, les données montrent une valeur constante de **100 %** pour tous les ouvrages analysés, traduisant une intégration systématique des figures au contenu textuel. En revanche, les résultats diffèrent de manière importante lorsqu'il s'agit de la mention explicite des figures dans le texte. Les proportions relevées varient de manière importante en fonction des ouvrages. Par exemple, le traité de *Hill (2008)* affiche un pourcentage relativement élevé, avec **56 %** de figures mentionnées dans le texte. Une tendance similaire est observée dans les deux ouvrages de *Chang (2019)*, avec des pourcentages de **58 %** (*Chang, 2019, Chimie générale*) et **56 %** (*Chang, 2019, Chimie des solutions*). À l'opposé, le traité de *Perrio (2017)* présente un résultat notablement plus faible, avec seulement **24 %** des figures mentionnées dans le texte. Le traité d'*Arnaud (2007)*, quant à lui, se distingue une fois de plus : il atteint un pourcentage particulièrement élevé de **88 %**, témoignant d'un soin exemplaire apporté à l'intégration des figures dans le contenu textuel.

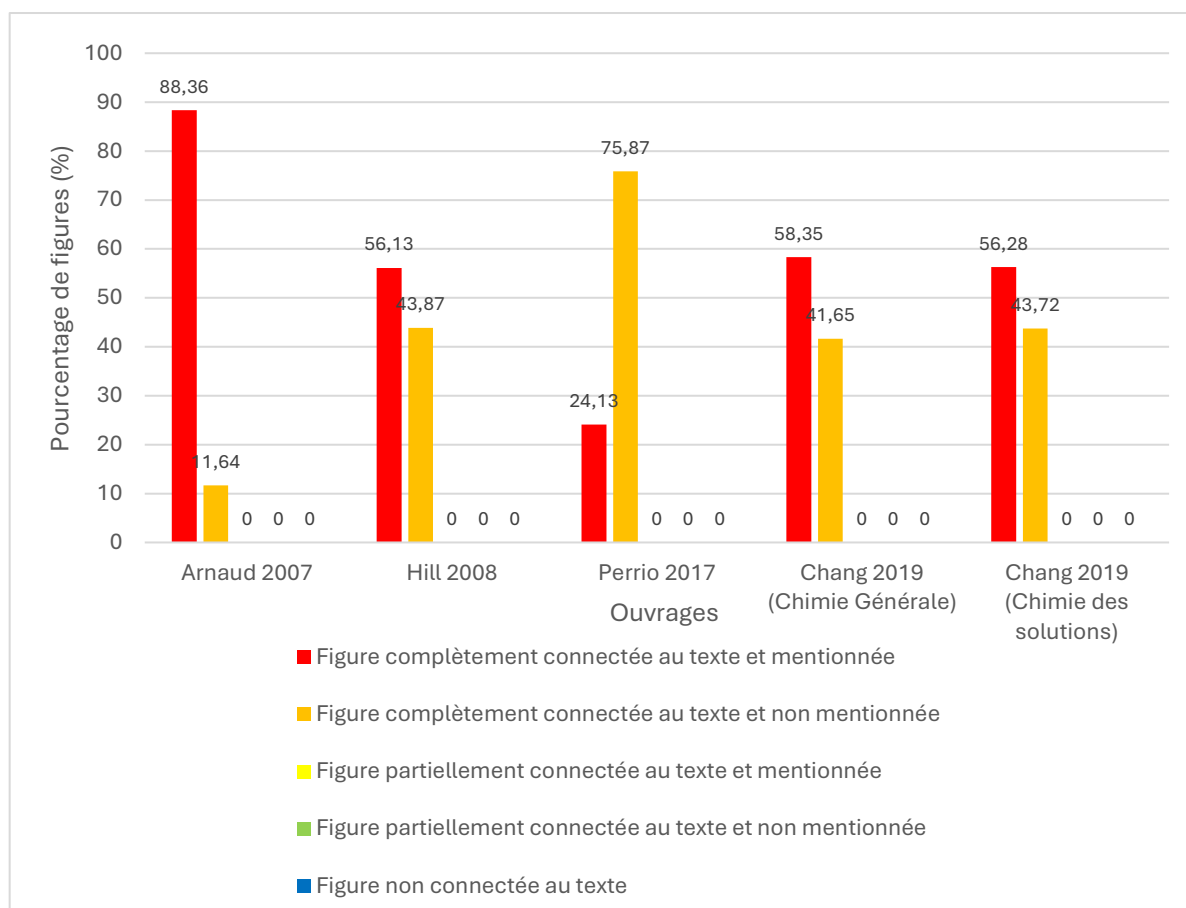


Figure 48 : Graphique du pourcentage de figure en fonction du critère n°3 selon les différents manuels de l'enseignement supérieur.

Une analyse plus détaillée des résultats obtenus pour le critère n°3, illustrée par la figure 49 ci-dessous, met en évidence plusieurs observations importantes. Tout d'abord, en ce qui concerne les figures de type macroscopique, la majorité des ouvrages étudiés présentent un pourcentage faible à moyen de figures explicitement mentionnées dans le texte. Par exemple, le traité de *Hill* (2008) affiche un taux de seulement **28 %**, tandis que les ouvrages de *Chang* (2019) présentent des pourcentages de **23 %** (*Chimie des solutions*) et **41 %** (*Chimie générale*). Le traité de *Perrio* (2017) se situe encore plus bas avec un pourcentage de seulement **4 %**. À l'inverse, l'ouvrage d'*Arnaud* (2007) se distingue nettement avec un taux élevé de **80 %** de figures macroscopiques mentionnées dans le texte. Un constat similaire est observé pour les figures de type submicroscopique. L'ouvrage de *Hill* (2008) affiche un pourcentage de **25 %**, tandis que les ouvrages de *Chang* (2019) atteignent respectivement **43 %** (*Chimie générale*) et **37 %** (*Chimie des solutions*). Une fois de plus, le traité de *Perrio* (2017) se situe en deçà des autres, avec une valeur de **0 %**. En revanche, le manuel d'*Arnaud* (2007) se démarque une nouvelle fois en atteignant un pourcentage de **100 %** pour les figures submicroscopiques mentionnées dans le texte. En ce qui concerne les figures de type symbolique et celles à plusieurs niveaux de représentation, les pourcentages relevés sont globalement plus élevés dans la plupart des ouvrages. Les figures de type symbolique affichent des valeurs allant de **72 %** (*Chang, 2019, Chimie générale*) à **89 %** (*Arnaud, 2007*). De manière similaire, les figures à plusieurs niveaux de représentation présentent des pourcentages allant de **68 %** (*Hill, 2008 et Chang, Chimie des solutions, 2019*) à **79 %** (*Chang, 2019, Chimie générale*). Cependant, le traité de *Perrio* (2017)

montre des valeurs sensiblement inférieures, avec seulement **35 %** de figures symboliques et **22 %** de figures à plusieurs niveaux de représentation mentionnées dans le texte. Ces résultats mettent en évidence que, pour la majorité des ouvrages étudiés, les figures de type symbolique et celles à plusieurs niveaux de représentation sont plus fréquemment mentionnées dans le texte que les figures de type macroscopique et submicroscopique. Une fois encore, l'ouvrage d'*Arnaud (2007)* se distingue par la qualité remarquable de la mention explicite des figures dans le texte.

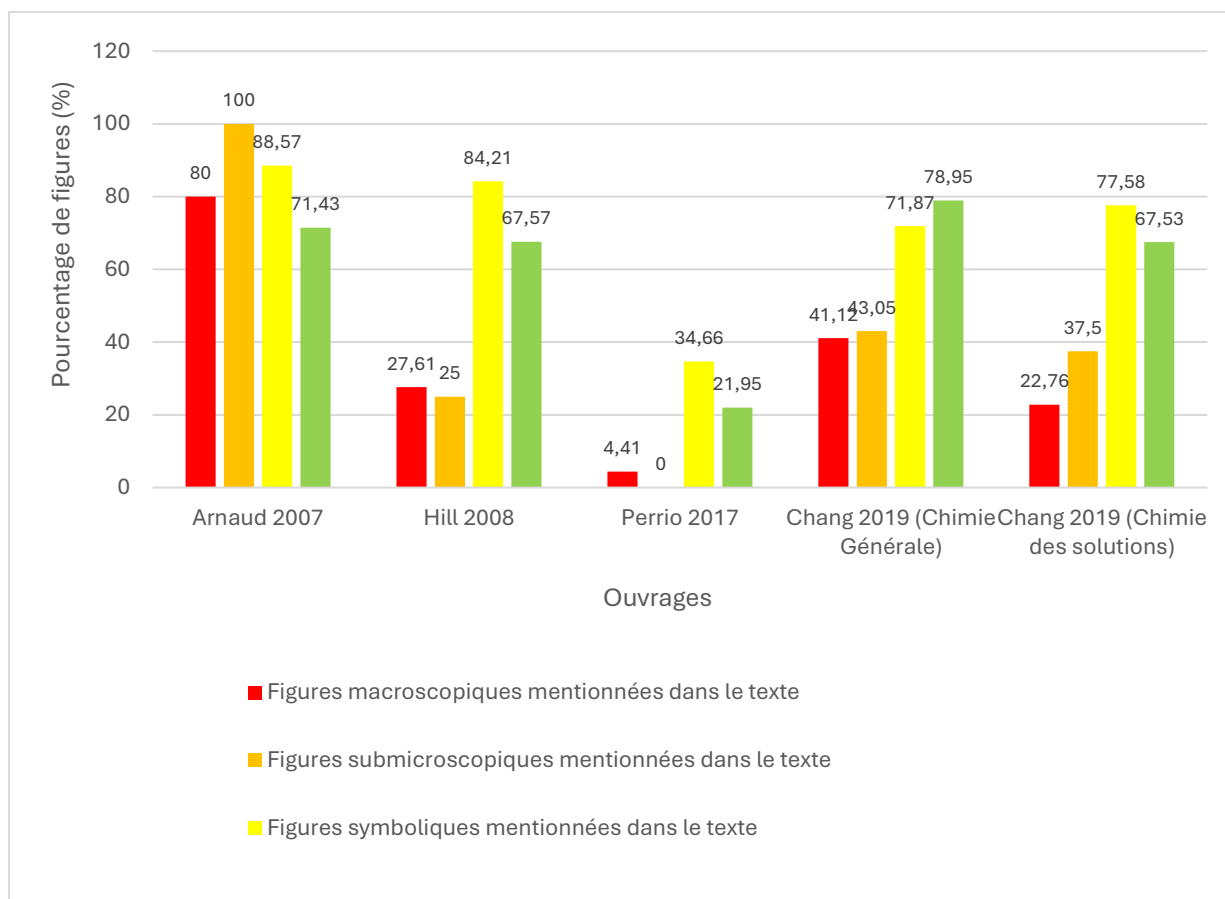


Figure 49 : Graphique du pourcentage de chaque type de figure en fonction du critère n°3 selon les différents ouvrages de l'enseignement supérieur.

Le dernier critère examiné pour évaluer la qualité des figures, à savoir le critère n°4 relatifs aux légendes et aux titres des figures présentes dans les ouvrages de l'enseignement supérieur, révèle des résultats intéressants. Ces résultats sont synthétisés dans la figure 50 ci-dessous. Une observation principale qui se dégage de cette analyse est le pourcentage relativement important de figures dotées d'une légende complète dans l'ensemble des ouvrages étudiés. En effet, les pourcentages relevés oscillent entre **55 %** pour l'ouvrage de *Hill (2008)* et **81 %** pour celui de *Chang (2019, Chimie des solutions)*. Le traité d'*Arnaud (2007)* se distingue particulièrement avec une proportion remarquable de **97 %** de figures présentant une légende complète. Ce constat met en évidence une tendance générale des ouvrages étudiés à proposer un grand nombre de figures accompagnées de légendes complètes, ce qui contribue non seulement à améliorer la qualité intrinsèque des figures, mais également à renforcer la clarté et la compréhension pour les étudiants.

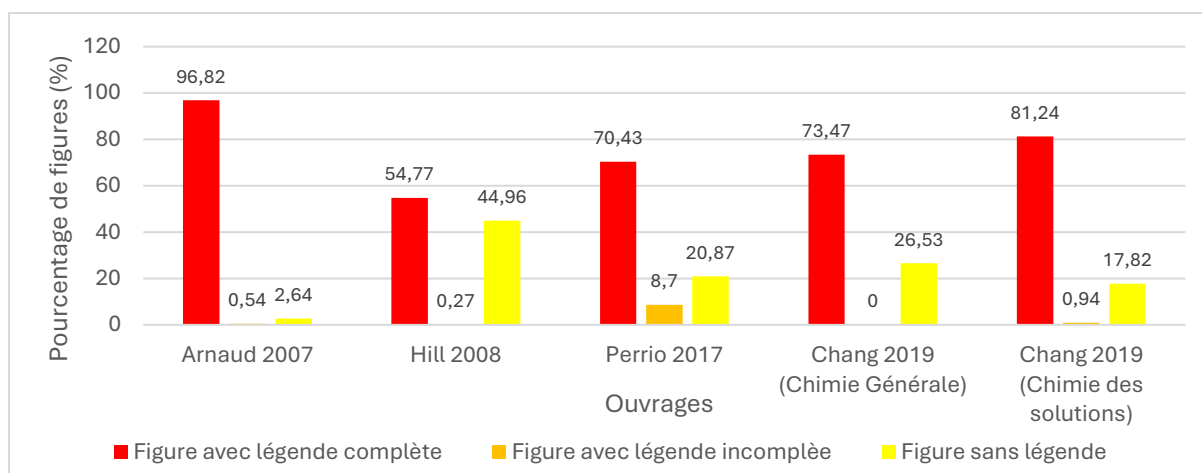


Figure 50 : Graphique du pourcentage de figure en fonction du critère n°4 selon les différents manuels de l'enseignement supérieur.

En examinant plus en détail les résultats relatifs aux légendes et aux titres des figures, illustrés dans la figure 51 ci-dessous, plusieurs observations se dégagent. Une constatation majeure est que, quel que soit le type de figure macroscopique, submicroscopique, symbolique ou à plusieurs niveaux de représentation, la majorité des figures présentes dans les ouvrages étudiés sont accompagnées de légendes complètes. Cependant, certaines exceptions méritent d'être soulignées. Par exemple, les traités de *Hill (2008)* et de *Perrio (2017)* ne présentent, respectivement, que **34 %** et **38 %** de figures macroscopiques dotées de légendes correctement élaborées, alors que les autres ouvrages affichent des pourcentages supérieurs à **80 %**. Par ailleurs, les pourcentages les plus élevés de figures accompagnées de légendes complètes varient selon les ouvrages. Dans l'ouvrage de *Hill (2008)*, ce sont les figures de type submicroscopique qui atteignent la proportion la plus élevée avec **81 %**. En revanche, dans le traité de *Perrio (2017)*, ce sont les figures combinant plusieurs représentations qui se distinguent avec **93 %**. Le traité d'*Arnaud (2007)* se démarque une fois de plus avec des proportions supérieures à 95 % de figures associées à des légendes appropriées, quel que soit le type de figure.

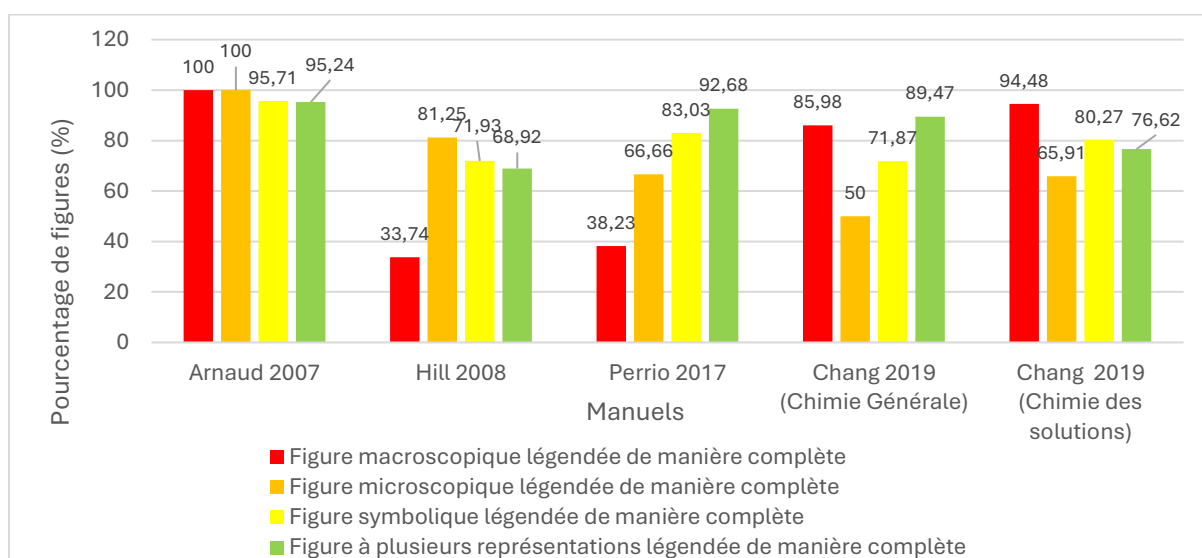


Figure 51 : Graphique du pourcentage de chaque type de figure en fonction du critère n°4 selon les différents manuels de l'enseignement supérieur.

4.3) Discussion et interprétation des résultats

L'analyse des figures présentes dans les ouvrages de premier cycle universitaire, examinées en détail dans la section 4.2, met en lumière des observations essentielles malgré la limitation du corpus à cinq ouvrages. Cette étude révèle des tendances importantes et interroge les choix éditoriaux ainsi que leurs implications pédagogiques.

Tout d'abord, les résultats de cette analyse montrent une prédominance des figures symboliques. Ces représentations, cruciales pour exprimer les concepts théoriques sont en concurrence avec les figures au niveau macroscopique. Celles-ci traduisent une volonté d'offrir des représentations visuelles plus accessibles, probablement en réponse à une demande croissante pour des supports facilitant l'appréhension concrète des phénomènes scientifiques. Cependant, cette orientation soulève des enjeux importants, notamment le risque de diluer la profondeur explicative au profit de l'attractivité visuelle.

Par ailleurs, la variabilité de l'occurrence des figures submicroscopiques (entre 4 % et 19 %), utilisées pour représenter les phénomènes à l'échelle atomique et moléculaire, met en évidence des choix éditoriaux divergents. Certains ouvrages privilégient une représentation plus fréquente de ces concepts, tandis que d'autres optent pour des approches assez minimalistes. Ces disparités reflètent non seulement les priorités des auteurs et éditeurs, mais également des visions pédagogiques parfois discordantes, ce qui peut entraîner une hétérogénéité dans la compréhension des étudiants selon les ouvrages utilisés.

En outre, l'étude met également en exergue l'importance de la corrélation entre les différents niveaux de représentation. Les figures dites « multiples » ou « hybrides », qui combinent plusieurs niveaux (macroscopique, submicroscopique et symbolique), restent faiblement représentées (entre 10 % et 20 % des figures). Ces représentations intégrées offrent une articulation plus cohérente des concepts théoriques et de leurs manifestations concrètes, un atout précieux pour l'apprentissage. Néanmoins, leur faible proportion indique que cet effort d'intégration reste encore trop limité, malgré son potentiel pédagogique incontestable.

Un autre point clé concerne l'étiquetage des figures, où une tendance préoccupante se dessine dans les ouvrages analysés les plus récents. Le traité d'*Arnaud (2007)*, plus ancien, propose des figures soigneusement étiquetées, offrant ainsi un cadre explicite pour l'interprétation. À l'inverse, les ouvrages plus actuels incluent une proportion croissante de figures non étiquetées ou accompagnées de légendes insuffisantes. Cette évolution pourrait résulter de la multiplication des figures macroscopiques de types « illustratives pures » ou d'une moindre attention portée aux standards éditoriaux, ce qui augmente le risque d'ambiguïté et complique l'assimilation des concepts par les étudiants.

La relation entre le texte et les figures constitue un autre aspect critique de cette analyse. Bien que les figures soient globalement intégrées au contenu textuel, les manuels récents présentent environ la moitié de figures non mentionnées explicitement dans le texte. Cette déconnexion affaiblit leur rôle en tant qu'outils pédagogiques, réduisant leur impact sur la compréhension

globale des notions abordées. Ce constat souligne la nécessité d'une meilleure coordination entre les illustrations et le discours écrit, afin d'optimiser leur complémentarité.

Concernant les légendes, bien que des efforts soient visibles dans les éditions récentes, elles peinent à égaler la qualité de l'ouvrage d'*Arnaud (2007)*. Les figures macroscopiques, en particulier, demeurent souvent les moins bien annotées, ce qui peut conduire à des malentendus ou à une interprétation erronée des concepts. Un effort accru pour renforcer la clarté et la précision des légendes apparaît indispensable pour garantir une transmission fidèle des connaissances.

Enfin, l'analyse révèle que les objectifs principaux de l'iconographie des ouvrages analysés sont la schématisation à but explicatif, la présentation de graphiques ou de tableaux de données et l'accroche de l'attention des élèves. Si l'ouvrage d'*Arnaud (2007)* met très peu d'accent sur l'accroche de l'attention du lecteur, les autres ouvrages y accordent plus d'attention mais il est difficile de distinguer une évolution temporelle.

En mobilisant partiellement les trois niveaux de représentation du triangle de Johnstone (macroscopique, submicroscopique et symbolique), les ouvrages de premier cycle universitaire étudiés montrent un effort pour couvrir l'ensemble des dimensions des concepts scientifiques. Toutefois, cette mobilisation reste fragmentée, les figures multiples et hybrides connectant les différents niveaux restant minoritaires (< 20 %). Les figures symboliques, bien qu'essentielles pour formaliser les concepts abstraits, sont souvent déconnectées des phénomènes observés. Les représentations macroscopiques peinent à établir des liens solides avec les autres niveaux. Quant aux figures submicroscopiques, leur présence relativement réduite limite leur contribution à une compréhension complète des phénomènes à l'échelle atomique et moléculaire.

Chapitre 5 :

Conclusion et perspectives

L'objectif central de cette étude consistait à analyser comment les ouvrages pédagogiques de l'enseignement secondaire et de première année universitaire mobilisent les trois niveaux de représentation du triangle de Johnstone dans l'apprentissage des élèves. Pour ce faire, nous avons mené une analyse iconographique exhaustive qui s'est articulée autour de plusieurs axes clés. Premièrement, nous avons exploré les différentes sources de difficultés rencontrées par les étudiants dans l'apprentissage de la chimie. Cette exploration a inclus une analyse détaillée du triangle de Johnstone, qui comprend les niveaux macroscopique, submicroscopique et symbolique. Nous avons également réalisé une revue de la littérature sur divers travaux cherchant à réinterpréter ce modèle pédagogique afin de mieux comprendre son impact sur l'apprentissage. En parallèle, nous avons examiné les apports des neurosciences concernant les processus cognitifs impliqués chez les étudiants lors de l'apprentissage de la chimie. Ces recherches neuroscientifiques fournissent des informations précieuses sur la manière dont le cerveau des étudiants traite et assimile les informations chimiques. De plus, nous avons passé en revue les méthodes didactiques disponibles dans la littérature scientifique, en nous concentrant sur celles visant à améliorer la maîtrise des niveaux de représentation en chimie. Ces méthodes incluent des approches pédagogiques innovantes et des stratégies éprouvées pour faciliter la compréhension des concepts chimiques complexes. À la suite de cette revue théorique, notre attention s'est portée sur les manuels scolaires et ouvrages didactiques du 1^{er} cycle de l'enseignement supérieur, qui demeurent des outils pédagogiques essentiels pour de nombreux enseignants. Nous avons ainsi procédé à une analyse approfondie des manuels de chimie de l'enseignement secondaire supérieur et de l'enseignement universitaire, en utilisant divers critères d'évaluation. Cette analyse portait spécifiquement sur les aspects iconographiques des manuels scolaires, car ce sont les images qui offrent une représentation plus visuelle et intuitive des concepts, jouant ainsi un rôle clé dans l'apprentissage des élèves. En nous concentrant sur les représentations visuelles, nous avons pu examiner comment les images intègrent et articulent les niveaux macroscopique, submicroscopique et symbolique, et dans quelle mesure elles permettent d'établir des liens entre eux. Cette analyse comparative a permis de mettre en lumière des tendances communes et des différences dans l'utilisation des trois niveaux de représentation du triangle de Johnstone. Ces observations fournissent des informations précieuses sur les approches pédagogiques et les choix éditoriaux des ouvrages utilisés dans l'enseignement de la chimie.

Tout d'abord, il a été constaté que les manuels belges et français de l'enseignement secondaire privilégient majoritairement les représentations macroscopiques et symboliques, leurs proportions étant plus équilibrée dans les 4 manuels français examinés. Les figures macroscopiques, qu'ils s'agissent de photos ou d'illustrations, permettent aux élèves de saisir les phénomènes à une échelle observable, tandis que les figures symboliques facilitent la modélisation des phénomènes à travers des équations, des graphiques et des diagrammes, renforçant ainsi la compréhension théorique des sciences. En revanche, les représentations

submicroscopiques, qui détaillent les phénomènes à l'échelle atomique et moléculaire, sont beaucoup moins fréquentes. Cette omission constitue un obstacle à une compréhension plus approfondie des phénomènes scientifiques, car elle réduit souvent les explications à un niveau macroscopique sans faire référence aux mécanismes sous-jacents. Dans les traités du 1^{er} cycle universitaire, certains ouvrages récents, comme celui de *Chang (2019)* tendant à mieux équilibrer les représentations macroscopiques, submicroscopiques et symboliques, même si leur intégration en des représentations multiples ou hybrides reste minoritaire.

La faible présence de figures intégrant simultanément les trois niveaux de représentation est donc une lacune importante tant au niveau secondaire que supérieur. De telles figures permettraient une compréhension plus complète des phénomènes scientifiques en montrant les liens entre les observations macroscopiques, les processus submicroscopiques et leur rationalisation à l'aide d'un langage symbolique. Le manque de ces figures dans les manuels de secondaire souligne une carence pédagogique, empêchant les élèves de développer une vision intégrée des concepts scientifiques. Dans les manuels universitaires, bien que leur utilisation soit un peu plus fréquente, leur proportion reste insuffisante pour réellement transformer les pratiques pédagogiques et favoriser une compréhension des concepts scientifiques.

L'étude a également mis en lumière une variabilité importante dans l'étiquetage des figures. De nombreux manuels de secondaire récents, qu'ils soient belges ou français, contiennent encore un nombre important de figures non étiquetées ou mal étiquetées. L'étiquetage correct des figures est essentiel pour éviter les ambiguïtés et garantir une compréhension claire des éléments et des relations représentés. Bien que des améliorations soient observées dans l'étiquetage des figures submicroscopiques et symboliques dans les manuels de secondaire récents, l'étiquetage demeure inégal et parfois incomplet. Dans les manuels universitaires, une observation similaire aux manuels du secondaire est réalisée. Ce manque d'étiquetage complet dans l'ensemble des manuels du secondaire et universitaire, complique l'assimilation des concepts par les étudiants.

De plus, le lien entre les figures et le texte est crucial pour la compréhension des concepts scientifiques. Dans les manuels de secondaire, les connexions entre les figures et le texte sont généralement très bonnes même si elles tendent à diminuer en importance dans les manuels belges plus récents. Cependant, tant dans les manuels français que belges, une proportion importante (en moyenne supérieure à **50 %**) des figures ne sont pas mentionnées explicitement dans le texte. Dans les ouvrages analysés destinés à l'enseignement universitaire, la connexion entre figures et textes est excellente mais une fraction très variable de (**12 % à 76 %**) des figures n'est pas mentionnée dans le texte. Ce constat souligne la nécessité d'une meilleure coordination entre les illustrations et le discours écrit, afin d'optimiser leur complémentarité.

L'analyse des objectifs des figures montre que les figures cherchant à accrocher l'attention de l'élève dominant dans les manuels du secondaire, tant français que belges. L'importance de ces figures croît clairement au cours des années de parution dans les manuels belges où cet objectif finit par l'emporter largement sur les autres. Dans les manuels français, la répartition des objectifs est plus homogène. Dans les ouvrages d'enseignement supérieur, l'objectif largement

majoritaire est la schématisation à but explicatif, montrant une accentuation plus forte vers l'abstraction. L'identification des rapports entre les trois niveaux du triangle de Johnstone est globalement l'objectif le moins représenté dans les figures, avec des pourcentages typiquement inférieurs à 10 %, tant au niveau secondaire qu'universitaire, malgré l'importance de ces liens pour une compréhension globale des concepts.

Pour l'avenir, plusieurs perspectives peuvent être envisagées pour améliorer l'utilisation des trois niveaux de représentation dans les manuels du secondaire et traités universitaires. Tout d'abord, il serait bénéfique d'accroître la présence des figures submicroscopiques pour permettre une compréhension plus complète des phénomènes à l'échelle atomique. Ensuite, développer davantage de figures hybrides intégrant les trois niveaux de représentation pourrait offrir une vision plus cohérente et compréhensible des concepts scientifiques. De plus, une attention accrue à l'étiquetage des figures, à la rédaction de légendes précises et à la corrélation explicite entre le texte et les illustrations, avec référence aux figures dans le texte, est essentielle pour éviter les ambiguïtés et renforcer la clarté pédagogique. Enfin, bien que les illustrations attractives soient importantes pour capter l'attention des étudiants, il est crucial de maintenir un équilibre avec des figures explicatives rigoureuses pour assurer une compréhension approfondie et complète des phénomènes scientifiques. Ce travail ouvre également des perspectives de recherche pour le développement de manuels scolaires plus efficaces. Par exemple, l'intégration systématique des avancées en neurosciences pourrait enrichir les approches pédagogiques en permettant de mieux adapter les contenus aux processus cognitifs des élèves. Par ailleurs, des collaborations entre enseignants, chercheurs en didactique et éditeurs pourraient favoriser la création de supports pédagogiques innovants et équilibrés, intégrant pleinement les trois niveaux de représentation du triangle de Johnstone pour une meilleure compréhension des concepts.

Cependant, il est essentiel de reconnaître les limitations de ce travail d'analyse. La taille limitée du corpus, comprenant seulement neuf manuels de l'enseignement secondaire et cinq manuels universitaires, peut restreindre la généralisation des conclusions. Si, au niveau belge, l'analyse des manuels de la collection Pirson permet une perspective diachronique, la plupart des auteurs étant restés les mêmes sur une longue période, ce n'est pas le cas des manuels français et des traités universitaires que nous avons examinés. En effet, dans ces derniers cas, les choix pédagogiques individuels des auteurs viennent se superposer aux tendances plus générales de l'évolution de l'enseignement. Il en va de même des comparaisons entre les différentes années de l'enseignement secondaire. De plus, les critères d'analyse, bien que rigoureusement définis, peuvent ne pas couvrir tous les aspects pertinents de l'utilisation des figures dans l'apprentissage des sciences. Enfin, l'évolution rapide des manuels scolaires et des pratiques pédagogiques peut rendre certaines observations obsolètes. Il serait donc bénéfique de répliquer cette analyse sur un corpus plus large et diversifié, ainsi que de suivre l'évolution des manuels sur une période plus étendue pour obtenir une vue d'ensemble plus complète et actualisée.

En somme, l'analyse comparative des manuels de secondaire et de première année universitaire met en évidence des forces et des faiblesses communes dans l'utilisation des trois niveaux de représentation du triangle de Johnstone. Des ajustements et des améliorations sont nécessaires

pour optimiser la présentation des concepts scientifiques et renforcer l'efficacité pédagogique, tant au niveau secondaire qu'universitaire.

Références

- Antczak, S., & Fiat, O. (2020). *Physique Chimie*. Hatier.
- Arer, L., Berthelot, S., & Lévêque, T. (2019). *Ire Physique Chimie Nouveau Programme*. Belin Education.
- Arnaud, P., Rouquérol, F., Chambaud, G., & Lissillour, R. (2007). *Chimie Physique* (6ème éd.). Dunod.
- Becker, N. M., Stanford, C., Towns, M. H., & Cole, R. S. (2015). Translating across macroscopic, submicroscopic, and symbolic levels: The role of instructor facilitation in an inquiry-oriented physical chemistry class. *Chemistry Education Research and Practice*, 16, 769–785. <https://doi.org/10.1039/C5RP00064E>.
- Brault Foisy, L.-M., Potvin, P., Riopel, M., & Masson, S. (2015). Is inhibition involved in overcoming a common physics misconception in mechanics? *Trends in Neuroscience and Education*, 4, 26–36. <https://doi.org/10.1016/j.tine.2015.03.001>.
- Bruce, M. R. M., Bruce, A. E., & Walter, J. (2022). Creating representation in support of chemical reasoning to connect macroscopic and submicroscopic domains of knowledge. *Journal of Chemical Education*, 99, 1734–1746. <https://doi.org/10.1021/acs.jchemed.1c00292>.
- Bruck, L. B., Bruck, A. D., & Phelps, A. J. (2010). "Gone" into solution: Assessing the effect of hands-on activity on students' comprehension of solubility. *Journal of Chemical Education*, 87, 107–112. <https://doi.org/10.1021/ED800016F>.
- Dulaurans, T., & Durupthy, A. (2016). *Physique Chimie Enseignement spécifique* (3ème éd.). Hachette Education.
- Chang, R., & Overby, J. (2019). *Chimie des solutions* (5ème éd.). De Boeck Supérieur.
- Chang, R., & Overby, J. (2019). *Chimie générale* (5ème éd.). De Boeck Supérieur.
- Eilks, I., Witteck, T., & Pietzner, V. (2018). The role and potential dangers of visualisation when learning about sub-microscopic explanations in chemistry education. *Center for Educational Policy Studies Journal*, 2(1), 125-145. <https://doi.org/10.26529/cepsj.398>.
- Galloway, K. R., Stoyanovich, C., & Flynn, A. B. (2017). Students' interpretations of mechanistic language in organic chemistry before learning reactions. *Chemistry Education Research and Practice*, 18, 353–374. <https://doi.org/10.1039/C6RP00231E>.
- Gkitzia, V., Salta, K., & Tzougraki, C. (2011). Development and application of suitable criteria for the evaluation of chemical representations in school textbooks. *Chemistry Education Research and Practice*, 12, 5–14. <https://doi.org/10.1039/C1RP90003J>.

- Gkitzia, V., Salta, K., & Tzougraki, C. (2020). Students' competence in translating between different types of chemical representations. *Chemistry Education Research and Practice*, 21(2), 307-320. <https://doi.org/10.1039/C8RP00301G>.
- Gulacar, O., Milkey, A., & Eilks, I. (2020). Exploring cluster changes in students' knowledge structures throughout general chemistry. *Eurasia Journal of Mathematics, Science and Technology Education*, 16(6), 1850. <https://doi.org/10.29333/ejmste/7860>.
- Head, M. L., Yoder, K., Genton, E., & Sumperl, J. (2017). A quantitative method to determine preservice chemistry teachers' perceptions of chemical representations. *Chemistry Education Research and Practice*, 18, 825–840. <https://doi.org/10.1039/C7RP00109F>.
- Hill, J., Petrucci, R., McCreary, T., & Perry, S. (2008). *Chimie des solutions* (4ème éd.). ERPI.
- Jaber, L. Z., & BouJaoude, S. (2012). A macro–micro–symbolic teaching to promote relational understanding of chemical reactions. *International Journal of Science Education*, 34, 973–998. <https://doi.org/10.1080/09500693.2011.569959>.
- Johnstone, A. H. (1991). Why is science difficult to learn? Things are seldom what they seem. *Journal of Computer Assisted Learning*, 7, 75–83. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2729.1991.tb00230.x>.
- Keiner, L., & Graulich, N. (2021). Beyond the beaker: Students' use of a scaffold to connect observations with the particle level in the organic chemistry laboratory. *Chemistry Education Research and Practice*, 22, 146. <https://doi.org/10.1039/D0RP00206B>.
- Keiner, L., & Graulich, N. (2020). Transitions between representational levels: Characterization of organic chemistry students' mechanistic features when reasoning about laboratory work-up procedures. *Chemistry Education Research and Practice*, 21, 469–482. <https://doi.org/10.1039/c9rp00241c>.
- Koopman, O. (2017). Investigating how science teachers in South Africa engage with all three levels of representation in selected chemistry topics. *African Journal of Research in Mathematics, Science and Technology Education*, 21(1), 15–25. <https://doi.org/10.1080/18117295.2016.1261546>.
- Lewis, S.E., & Wang, Y. (2020). Analytical chemistry students' explanatory statements in the context of their corresponding lecture. *Chemistry Education Research and Practice*, 21(4), 1183-1198. <https://doi.org/10.1039/D0RP00063A>.
- Liu, Y., & Taber, K. S. (2016). Analysing symbolic expressions in secondary school chemistry: Their functions and implications for pedagogy. *Chemistry Education Research and Practice*, 17, 439–451. <https://doi.org/10.1039/C6RP00013D>.

- Maksimenko, N., Okolzina, A., Vlasova, A., Tracey, C., & Kurushkin, M. (2021). Introducing atomic structure to first-year undergraduate chemistry students with an immersive virtual reality experience. *Journal of Chemical Education*, 98, 2104–2108. <https://doi.org/10.1021/acs.jchemed.0c01441>.
- Nenciovici, L., Allaire-Duquette, G., & Masson, S. (2019). Brain activations associated with scientific reasoning: A literature review. *Cognitive Processing*, 20(2), 139–161. <https://doi.org/10.1007/s10339-018-0896-z>.
- Nyachwaya, J. M., & Wood, N. B. (2014). Evaluation of chemical representations in physical chemistry textbooks. *Chemistry Education Research and Practice*, 15, 720–728. <https://doi.org/10.1039/C4RP00113C>.
- Organisation de coopération et de développement économiques. (2022). *PISA 2022 assessment and analytical framework*. OCDE. <https://doi.org/10.1787/dfe0bf9c-en>.
- Petillion, R. J., & McNeil, W. S. (2020). “Johnstone’s triangle as a pedagogical framework for flipped-class instructional videos in introductory chemistry”. *Journal of Chemical Education*, 97, 1536–1542. <https://doi.org/10.1021/acs.jchemed.9b01105>.
- Perrio, S., Roy, B., & Winum, J.-Y. (2017). *Chimie*. Dunod.
- Pham, L., & Tytler, R. (2021). The semiotic function of a bridging representation to support students’ meaning making in solution chemistry. *Research in Science Education*, 52, 853–869. <https://doi.org/10.1007/s11165-021-10022-w>.
- Philipp, S.B., Cooper, D.K., & Yezierski, E.J. (2014). Development of a protocol to evaluate the use of representations in secondary chemistry instruction. *Chemistry Education Research and Practice*, 15, 777-786. <https://doi.org/10.1039/C4RP00098F>.
- Pirson, P., Bribosia, A., Martin, C.L., & Tadino, A. (1990). *Chimie Sciences expérimentale 6e rénové* (2ème éd.). De Boeck & Larcier.
- Pirson, P., Bribosia, A., Martin, C.L., & Tadino, A. (2003). *Chimie Sciences générales 6e*. De Boeck & Larcier.
- Pirson, P., Bribosia, A., Snauwaert, P., Tadino, A., & Van Elsuwé, R. (2022). *Chimie Sciences générales 5e* (1ère éd.). Wommelgem : De Boeck.
- Pirson, P., Bordet, H., Snauwaert, P., & Van Elsuwé, R. (2022). *Chimie Sciences générales 4e* (1ère éd.). Wommelgem : De Boeck.
- Pirson, P., Bribosia, A., Snauwaert, P., Tadino, A., & Van Elsuwé, R. (2023). *Chimie Sciences générales 6e* (3ème éd.). Wommelgem : De Boeck.

- Popova, M., & Jones, T. (2021). Chemistry instructors' intentions toward developing, teaching, and assessing student representational competence skills. *Chemistry Education Research and Practice*, 22, 733-748. <https://doi.org/10.1039/D0RP00329H>.
- Rees, S., Kind, V., & Newton, D. (2021). The development of chemical language usage by non-traditional students: The interlanguage analogy. *Research in Science Education*, 51, 419-438. <https://doi.org/10.1007/s11165-018-9801-0>.
- Sanchez, J. P. (2018). Translational skills of students in chemistry. *Science Education International*, 29(4), 214-219. <https://doi.org/10.33828/sei.v29.i4.3>.
- Saritas, D., Özcan, H., & Adúriz-Bravo, A. (2021). Observation and inference in chemistry teaching: A model-based approach to the integration of the macro and submicro levels. *Science & Education*, 30, 1289-1314. <https://doi.org/10.1007/s11191-021-00216z>.
- Schmidt, S. J. (2021). Helping students connect the macroscopic level to the molecular level. *Journal of Food Science Education*, 20, 166-177. <https://doi.org/10.1111/15414329.12232>.
- Seethaler, S., Czewkowski, J., & Wynn, L. (2018). Analyzing general chemistry texts' treatment of rates of change concepts in reaction kinetics reveals missing conceptual links. *Journal of Chemical Education*, 95, 28-36. <https://doi.org/10.1021/ACS.JCHEMED.7B00238>.
- Sjöström, J. (2013). Towards Building-oriented chemistry education. *Science & Education*, 22, 1873-1890. <https://doi.org/10.1007/S11191-011-9401-0>.
- Taber, K. S. (2001). Building the structural concepts of chemistry: Some considerations from educational research. *Chemistry Education Research and Practice*, 2, 123-158. <https://doi.org/10.1039/B1RP90014E>.
- Taber, K.S. (2001). Constructing chemical concepts in the classroom? Using research to inform practice. *Chemistry Education Research and Practice*, 2(1), 43-51. <https://doi.org/10.1039/B0RP90029J>.
- Taber, K.S. (2015). Exploring the language(s) of chemistry education. *Chemistry Education Research and Practice*, 16(2), 193-197. <https://doi.org/10.1039/C5RP90003D>.
- Taber, K.S. (2013). Revisiting the chemistry triplet: Drawing upon the nature of chemical knowledge and the psychology of learning to inform chemistry education. *Chemistry Education Research and Practice*, 14(2), 156-168. <https://doi.org/10.1039/C3RP00012E>.
- Taber, K.S. (2014). The significance of implicit knowledge for learning and teaching chemistry. *Chemistry Education Research and Practice*, 15(4), 447-461. <https://doi.org/10.1039/C4RP00124A>.

- Thomas, M.S., Ansari, D., & Knowland, V.C. (2018). Annual research review: Educational neuroscience: Progress and prospects. *Journal of Child Psychology and Psychiatry*, 60(4), 477-492. <https://doi.org/10.1111/jcpp.12973>.
- Vaughn, A.R., Brown, R.D., & Johnson, M.L. (2020). Understanding conceptual change and science learning through educational neuroscience. *Mind, Brain, and Education*, 14(2), 82-93. <https://doi.org/10.1111/mbe.12237>.
- Villar, J.-G., Bouland, A., Cauwet, J., Menny, J., Paul, J.-C., & Rivière, A. (1995). *Chimie, Collection Galileo*. Bordas.
- Vygotski, L.S. (1985). *Pensée et langage*. Traduction de François Sève ; commentaire de Jean Piaget. Paris : *Editions Sociales*.
- Wu, M., & Yeziarski, E.J. (2023). Pedagogical chemistry sensemaking: A novel conceptual framework to facilitate pedagogical sensemaking in model-based lesson planning. *Chemistry Education Research and Practice*, 23(2). <https://doi.org/10.1039/D1RP00282A>.
- Xu, L. (2021). Towards a social semiotic interpretation of the chemistry triangle: Student exploration of changes of state in an Australian secondary science classroom. *International Journal of Science and Mathematics Education*, 20(4), 705-726. <https://doi.org/10.1007/s10763-021-10190-1>.