Registre symbolique de la chimie (1/2) : les spécificités de ce langage

Publié le 06.11.20 | Par Sophie Canac

Cet article de didactique fait partie d'un dossier relatif au registre symbolique de la chimie. Il traite des spécificités de ce langage et de son élaboration historique, tandis qu'un deuxième article traite de l'apprentissage de ce langage.

Les chimistes, comme les mathématiciens ainsi que l'a montré Duval (1993), sont amenés à utiliser des représentations pour les objets qu'ils sont censés « manipuler » sur le papier, objets qui sont pour la plupart non directement accessibles aux sens. Du collège au lycée, un élève rencontrera, en plus du nom et de la formule brute, au moins sept autres représentations sémiotiques [1] pour la même espèce chimique (Figure 1) avec chacune ses propres règles et véhiculant des informations différentes (Le Maréchal & Cross, 2010).

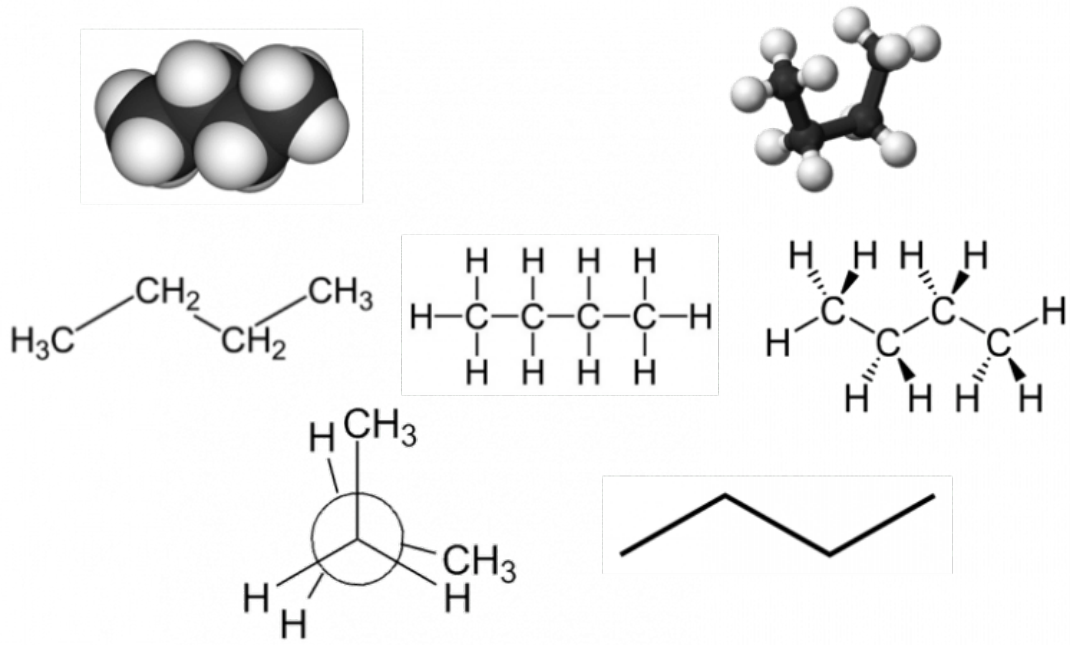


Figure 1 - Différentes représentations du butane (de formule C_4H_{10}) dans les ouvrages scolaires du second degré

Auteur(s)/Autrice(s) : Sophie Canac – Licence : CC-BY-NC-ND

On pourrait penser qu'un langage scientifique est un outil de communication « efficace », et qu'à chaque signifiant [2] est associé un signifié et un seul, ce qui pourrait alors aider les élèves. Or, comme les mots d'un langage « naturel », le signifié d'un symbole ou d'une formule dépend du contexte. Dans l'équation de combustion du carbone ($C(s) + O_2(g) = CO_2(g)$), « C (s)» apparaît deux fois avec deux significations différentes : le solide graphite en début d'équation et l'atome de carbone dans la formule du dioxyde de carbone. Dans les deux cas, elle représente aussi l'élément chimique, ce qui permet notamment d'ajuster l'équation de la réaction. On retrouve cette même ambiguïté avec le nom. Dans les trois exemples ci-dessous, le mot carbone se

rapporte respectivement à : l'élément, le solide graphite, l'atome.

- exemple 1 : l'éthène contient du carbone ;
- exemple 2 : le carbone brûle dans le dioxygène ;
- exemple 3 : le carbone a 4 électrons placés dans les orbitales hybrides sp3 ;

On peut alors s'interroger sur les significations qu'un élève donne aux différentes représentations utilisées en chimie. Quand un enseignant de chimie utilise la lettre C, il y voit immédiatement le carbone, et suivant le contexte, sa signification macroscopique ou microscopique. Le novice risque de n'y voir que la troisième lettre de l'alphabet en écriture d'imprimerie. L'interprétation des noms, des symboles et des formules chimiques nécessite une véritable enquête pour pouvoir y associer le « bon » signifié.

> *C'est un processus qui se déroule dans l'esprit de l'interprète : il débute avec la perception du signe et se termine avec la présence à son esprit de l'objet du signe. C'est un processus inférentiel. [...]. Il s'agit d'une sorte d'enquête dont nous sommes le plus souvent inconscients dans la vie quotidienne car sa répétition à tout instant a créé en nous des habitudes d'interprétation quasiment instantanée.*
>
> — Marty & Marty, 1992

Nous présentons dans cet article les spécificités et les difficultés repérées chez les élèves dans l'apprentissage de ce que Jacob (2001) appelle le langage symbolique de la chimie : les noms et les formules. Avant cela, nous montrons ce qui permet de considérer les noms et les formules chimiques comme un véritable langage et nous donnons quelques éléments de son élaboration historique. Nous terminons cet article en donnant des pistes pour son enseignement. Cet article est issu d'un travail de recherche mené récemment dans une thèse (Canac, 2017).

1. Les représentations symboliques en chimie: un langage

Comme un langage, les chimistes ont élaboré un code, ou un système de mots, de symboles et de formules, partagé par l'ensemble de la communauté des chimistes et leur permettant de communiquer entre eux.

> *For a chemist, natural signs are whatever can be seen, smelled and felt before, during and after an experiment. This assortment of signs is actively linked to that other group of signs devised by chemists to communicate among themselves - the "language of chemistry".*
>
> « Pour un chimiste, les signes naturels sont tout ce qui peut être vu, senti et ressenti avant, pendant et après une expérience. Cet assortiment de signes est activement lié à cet autre groupe de signes conçus par les chimistes pour communiquer entre eux - le "langage de la chimie". »
>
> — Weininger, 1998, p. 18-19

Jacob (2001) effectue un parallèle avec une langue ordinaire, en considérant que :

- les symboles des éléments chimiques figurent l'alphabet ;
- les formules chimiques, élaborées à partir d'associations de symboles, correspondent aux mots ;
- les équations chimiques, enfin, constituent l'équivalent de phrases, puisqu'elles peuvent être vues comme association des « mots » (les formules).

1.1. Des règles syntaxiques

Comme toute langue, celle des chimistes possède un ensemble de règles syntaxiques pour former les mots et les phrases qui sont :

- des règles orthographiques comme la valence pour les atomes dans les molécules et la charge pour les ions dans les structures polyatomiques ;
- des règles de grammaire avec la conservation des éléments chimiques et la conservation de la charge électrique dans les équations chimiques symbolisant les réactions modélisant les transformations.

La compréhension des noms et des formules chimiques, comme dans une langue, dépend des préfixes et des suffixes et de l'ordre des mots (Laszlo, 2011). Les formules chimiques peuvent être disséquées « comme s'il s'agissait de vocables »[3] (Laszlo, 1993, p. 41). Nous pouvons reconnaître dans une formule telle que $(CH_3)_2CHCH_2CH_2OH$, ou dans son nom le 3-méthylbutan-1-ol, les racines, les préfixes et les suffixes comme le ferait un grammairien avec les mots. Les noms et les formules chimiques peuvent également subir de nombreuses combinaisons en partant d'un squelette unique et en formant des dérivés comme dans l'exemple du groupe cyclohexyle qui peut donner le cyclohexane, le cyclohexanol, l'éthanoate de cyclohexyle, le chlorure de cyclohexyle, etc. (Laszlo, 2011, p. 1697).

1.2. Des règles sémantiques

Cette langue a aussi ses règles sémantiques basées sur l'expérience et sur l'existant, même s'il n'y a aucune ressemblance entre les signes utilisés et les molécules qui sont représentées (Edeline, 2009). Dans les formules de l'hydroxyde de sodium (NaOH) et de l'eau (H_2O), nous retrouvons le même symbole O, qu'il soit uni avec le sodium ou avec deux hydrogènes. Nous pourrions avoir l'impression d'avoir le même atome d'oxygène dans les deux formules et pourtant l'organisation électronique de l'oxygène n'y est pas identique.

> *Cette transférabilité fait de la manipulation des symboles chimiques une langue très proche du langage usuel. [...] Le langage de la chimie est plus qu'un code, il a le « bougé » sémantique d'une langue.*
>
> — Laszlo (1993, p. 64-65)

Les chimistes sont capables, à partir de très peu de signes, de décrire tout à la fois le réel dans son ensemble mais également de prévoir l'inconnu et l'inexistant.

> *The ability to evoke a fictional world indistinguishable from the real one is another characteristic that the chemical codes shares with natural languages.*
>
> « La capacité d'évoquer un monde fictif indiscernable du monde réel est une autre caractéristique que les codes chimiques partagent avec les langages naturels. »
>
> — Weininger (1998, p. 23)

En respectant les règles syntaxiques, il est possible de former de nouveaux « mots » (les formules) ou de réaliser dans les phrases (les équations des réactions chimiques) une infinité de permutations de symboles. Certains de ces mots ou de ces permutations sont corrects et représentent véritablement de la chimie. D'autres sont un non-sens et ne reflètent aucune espèce ou aucun processus chimique connus (Taber, 2009).

> *Les symboles du chimiste ne sont pas uniquement des « représentations » qui peuvent être jetées quand elles ne*

> *fonctionnent plus. Le chimiste y met également de la « réalité ».*
>
> — Bachelard (2010, p. 156)

1.3. Un signifiant – Plusieurs signifiés

Une langue scientifique est censée être un système univoque dépouillé de connotations et de significations implicites (Mounin, 1981). Pourtant, comme dans une langue ordinaire, la signification des « mots » en chimie (les noms et les formules) dépend du contexte. Plusieurs signifiés peuvent être associés à un même signifiant. Seul le contexte nous permet de dire si la formule H_2O représente une molécule ou une quantité quelconque, un gaz, un liquide ou un solide, un acide ou une base, un nucléophile ou un électrophile (Weininger, 1998, p. 22). En introduction l'exemple du nom « carbone » et du symbole « C » a déjà été développé.

1.4. Un signifié – Plusieurs signifiants

Le code chimique possède une véritable flexibilité avec la possibilité d'élision[4] de symboles, les H et C dans les formules topologiques organiques, ou le remplacement des chaînes organiques : un R pour les chaînes aliphatiques et un Ar pour les chaînes aromatiques (Mounin, 1981). Comme dans toutes les langues, on peut observer des variations « régionales » (Taber, 2009). Entre l'organicien et le thermochimiste, les équations ne prennent pas nécessairement la même forme. L'un va préférer des formules semi-développées alors que l'autre travaillera de façon privilégiée à partir des formules brutes. Des choix de représentations peuvent être décidés dans les programmes pour faciliter les apprentissages comme l'écriture de l'ion hydroxyde sous forme HO^- plutôt qu'OH^-, facilitant ainsi le repérage de l'atome portant la charge, ces différentes écritures sembleront d'une importance mineure pour l'expert mais peuvent s'avérer beaucoup plus difficile à appréhender pour le novice si une légère différence dans le signifiant est destinée à impliquer une différence dans le signifié (Taber, 2009).

2. L'élaboration historique de ce langage

L'élaboration de ce langage a sa propre histoire. Lavoisier est à l'origine « de la révolution chimique sémantique et ordinatrice » (Dagognet, 2002, p.7). Avant celui-ci, la « langue » et la chimie ne fonctionnent pas ensemble (Laszlo, 1993). Dans la première moitié du XIX^{e} siècle, trois temps forts se dégagent dans l'élaboration des représentations symboliques en lien avec le développement des connaissances empiriques et l'apparition des nouvelles théories de la matière :

- l'élaboration d'une nomenclature par Lavoisier s'appuyant sur le concept de « simple », ou substance indécomposable, et sur les expériences de composition et de décomposition des substances faites au laboratoire. L'eau, notamment, perd son statut d'élément. La nomenclature s'élabore contre la théorie du phlogistique et ouvre la voie à la chimie en tant que science. Lavoisier est conscient que la nouvelle nomenclature est une véritable révolution plutôt qu'une réforme, une rupture brusque et douloureuse avec le passé (Sliwka, 2003) ;
- l'élaboration des symboles et d'une arithmétique par Berzelius en lien avec la théorie atomique et les combinaisons fixes des atomes. Les chimistes vont traduire les expériences faites en laboratoire par des équations chimiques écrites au moyen de formules (Laugier, 1998, p. 163) ;
- l'élaboration des formules développées avec l'explosion de la chimie organique, et en lien avec le concept de molécules et d'arrangement des atomes dans la molécule. Pour les chimistes comme Laurent, Couper ou Boutlerow la structure chimique devient la source des propriétés chimiques des composés. « La nature chimique d'une molécule composée dépend de la nature, de la quantité de ses constituants élémentaires et de sa structure chimique » (Kluge & Larder, 1971, p. 290).

Le « langage » de la chimie, en véhiculant les nouvelles théories, est un élément essentiel du processus de développement de la chimie du XIX^{e} siècle. Ce système de représentations a amené de significatives avancées entre 1820 et 1850 (Klein, 2001b). C'est notamment en utilisant le système de Berzelius que Dumas en vient à proposer le concept de substitution (Klein, 2001a). La composition de chaque substance chimique écrite au moyen de lettres et de chiffres « permet la manipulation formelle des symboles indépendamment de leurs signifiés empiriques, pour autant que le chimiste suive certaines règles générales » (Laszlo, 1993, p. 12). Les formules sont de véritables « outils de papier » (Klein, 2001b) permettant de réaliser des expériences sur une

feuille blanche en lieu et place de la paillasse.

> *La formule développée est un substitut rationnel qui donne, pour l'expérience, une comptabilité claire des possibilités. Il y a dès lors des expériences chimiques qui apparaissent a priori impossibles parce qu'elles sont interdites par les formules développées. [...] Vice versa, il y a des expériences qu'on n'aurait jamais songé à réaliser, si l'on n'avait pas prévu a priori leur possibilité en se confiant aux formules développées. On raisonne sur une substance chimique dès qu'on en a établi une formule développée. On voit donc qu'à une substance chimique est associé désormais un véritable noumène**[1]**.*
>
> [1] Dans la doctrine de Kant, réalité intelligible qui ne peut être l'objet d'une connaissance empirique (Source : article *Noumène* de Centre National de Ressources Textuelles et Lexicales (http://www.cnrtl.fr/definition/noumene)).
>
> — Bachelard cité par Lecourt (2002, p. 78-79)

Les représentations posées sur le papier ont permis d'élaborer de véritables hypothèses scientifiques (Bachelard, 2010). La syntaxe a permis aux chimistes de constituer de nouvelles formules pour représenter des substances non encore synthétisées (Kaya & Erduran, 2013, p. 1746). L'écriture des structures moléculaires planes sur une feuille de papier a servi d'auxiliaire puissant pour les chimistes dans l'interprétation des transformations chimiques (Dumon & Luft, 2008, p. 12).

L'élaboration du langage de la chimie se fait à partir de concepts toujours actuels comme les notions d'espèce chimique, de corps simple et composé, d'atome, etc. Le langage, à son tour, a contribué à l'élaboration de nouvelles découvertes : l'atomicité, l'arrangement des atomes, certaines synthèses organiques, les réactions de substitution, etc. La chimie moderne s'est constituée en même temps que son langage.

3. Bibliographie

1. Al-Kunifed, A., Good, R., & Wandersee, J. (1993). Investigation of High School Chemistry Students' Concepts of Chemical Symbol, Formula, and Equation: Students' Prescientific Conceptions. Consulté à l'adresse http://www.eric.ed.gov/ERICWebPortal/recordDetail?accno=ED376020
2. Bachelard, G. (2010). Le matérialisme rationnel (Édition : 4e édition). Paris : Presses Universitaires de France - PUF.
3. Barlet, R. (1999). L'espace épistemologique et didactique de la chimie. Actualité Chimique, (223), 1423–1433.
4. Barlet, R., & Plouin, D. (1994). L'équation-bilan en chimie un concept intégrateur source de difficultés persistantes. Aster, (18), 25-55.
5. Ben-Zvi, R., Eylon, B., & Silberstein, J. (1987). Students' visualization of a chemical reaction. Education in chemistry, 24(4), 117–120.
6. Canac, S. (2017). Le langage symbolique de la chimie en tant que méta-niveau entre registre empirique et registre des modèles : une problématique de l'enseignement-apprentissage de chimie (Thèse de doctorat). Université Sorbonne Paris Cité.
7. Canac, S., & Kermen, I. (2016). Exploring the mastery of French students in using basic notions of the language of chemistry. Chemistry Education Research and Practice, 17(3), 452-473.
8. Carretto, J., & Viovy, R. (1994). Relevé de quelques obstacles épistémologiques dans l'apprentissage du concept de réaction chimique. Aster, (18), 12-26.
9. Dagognet, F. (2002). Tableaux et langages de la chimie : essai sur la représentation. Seyssel, France: Champ Vallon.

10. Dehon, J., & Snauwaert, P. (2015). L'équation de réaction : une équation à plusieurs inconnues. Étude de productions d'élèves de 16-17 ans (grade 11) en Belgique francophone. RDST. Recherches en didactique des sciences et des technologies, (12), 209–235.
11. Dumon, A., & Luft, R. (2008). Naissance de la chimie structurale. Les Ulis, France : EDP sciences.
12. Duval, R. (1993). Registres de représentation sémiotique et fonctionnement cognitif de la pensée. Annales de didactique et de sciences cognitives, 5, 37–65.
13. Edeline, F. (2009). Les fonctions sémiotique et heuristique des symboles chimiques : Ou de l'icône au symbole et retour. Protée, 37(3), 45-56.
14. Fabre, M. (2005). Deux sources de l'épistémologie des problèmes : Dewey et Bachelard. Les Sciences de l'éducation-Pour l'Ère nouvelle, 38(3), 53–67.
15. Fensham, P. J. (2002). Implications, large and small, from chemical education research for the teaching of chemistry. Química nova, 25(2), 335–339.
16. Fillon, P. (1997). Des élèves dans un labyrinthe d'obstacles. Aster, (25), 113-141.
17. Furio, C. J., Bullejos, J., & de Manuel, E. (1994). L'apprentissage de la réaction chimique comme activité de recherche. Aster, (18), 141-164.
18. Jacob, C. (2001). Analysis and synthesis. Hyle: An International Journal for the Philosophy of Chemistry, 7, 31–50.
19. Johnstone, A. H. (1993). The development of chemistry teaching: A changing response to changing demand. Journal of Chemical Education, 70(9), 701-705.
20. Kaya, E., & Erduran, S. (2013). Integrating Epistemological Perspectives on Chemistry in Chemical Education: The Cases of Concept Duality, Chemical Language, and Structural Explanations. Science & Education, 22(7), 1741-1755.
21. Keig, P. F., & Rubba, P. A. (1993). Translation of representations of the structure of matter and its relationship to reasoning, gender, spatial reasoning, and specific prior knowledge. Journal of Research in Science Teaching, 30(8), 883–903.
22. Kermen, I. (2018). Enseigner l'évolution des systèmes chimiques au lycée Savoirs et modèles, raisonnements d'élèves, pratiques enseignantes. Rennes: Presses Universitaires de Rennes.
23. Kermen, I., & Méheut, M. (2009). Different models used to interpret chemical changes: analysis of a curriculum and its impact on French students' reasoning. Chemistry Education Research and Practice, 10(1), 24-34.
24. Kermen, I., & Méheut, M. (2011). Grade 12 French students' use of a thermodynamic model for predicting the direction of incomplete chemical changes. International Journal of Science Education, 33(13), 1745–1773.
25. Klein, U. (2001a). Berzelian Formulas as Paper Tools in Early Nineteenth-Century Chemistry. Foundations of Chemistry, 3(1), 7-32.
26. Klein, U. (2001b). Paper tools in experimental cultures. Studies in History and Philosophy of Science Part A, 32(2), 265-302.
27. Kluge, F. F., & Larder, D. F. (1971). AM Butlerov. On the chemical structure of substances. Journal of Chemical Education, 48(5), 289-291.
28. Laszlo, P. (1993). La Parole des choses ou le langage de la chimie. Paris: Editions Hermann.
29. Laszlo, P. (2011). Towards Teaching Chemistry as a Language. Science & Education, 22(7), 1669-1706.
30. Laugier, A. (1998). Représentation de la réaction chimique dans les registres macroscopique et microscopique : contribution au repérage des obstacles épistémologiques. Une étude en classe de seconde. (Thèse de doctorat). Université de Pau.
31. Le Maréchal, J.-F., & Cross, D. (2010). Difficultés d'apprentissage liées aux représentations en chimie. Le BUP physique chimie, 928, 1025–1035.

32. Lecourt, D. (2002). L'épistémologie historique de Gaston Bachelard. Paris : Vrin.

33. Marais, P., & Jordaan, F. (2000). Are we taking symbolic language for granted? Journal of Chemical Education, 77(10), 1355.

34. Mounin, G. (1981). A Semiology of the Sign System Chemistry. Diogenes, 29(113-114), 216-228.

35. Mzoughi-Khadhraoui, I., & Dumon, A. (2012). L'appropriation par des élèves tunisiens débutants du langage permettant de représenter la réaction chimique. Recherches en didactique des sciences et des technologies, (6), 89-118.

36. Nakhleh, M. B., & Mitchell, R. C. (1993). Concept learning versus problem solving: There is a difference. Journal of Chemical Education, 70(3), 190-192.

37. Roletto, E., & Piacenza, B. (1994). Faut-il construire le concept de substance? Aster, (18), 63-74.

38. Sanger, M. J. (2000). Using particulate drawings to determine and improve students' conceptions of pure substance and mixtures. Journal of Chemical Education, 77(6), 762-766.

39. Sanger, M. J. (2005). Evaluating students' conceptual understanding of balanced equations and stoichiometric ratios using a particulate drawing. Journal of Chemical Education, 82(1), 131-134.

40. Sliwka, H.-R. (2003). Reform of Chemical Language as a Model for Spelling Reform. Journal of the Simplified Spelling Society, (32), 24–28.

41. Solomonidou, C., & Stavridou, H. (1994). Les transformations des substances, enjeu de l'enseignement de la réaction chimique. Aster, 75-95.

42. Stains, M., & Talanquer, V. (2007). Classification of chemical substances using particulate representations of matter: An analysis of student thinking. International Journal of Science Education, 29(5), 643–661.

43. Taber, K. S. (2009). Learning at the Symbolic Level. In J. K. Gilbert & D. Treagust (Éd.), Multiple Representations in Chemical Education (Vol. 4, p. 75-105). Dordrecht: Springer Netherlands.

44. 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.

45. Taber, K. S., & Bricheno, P. (2009). Coordinating Procedural and Conceptual Knowledge to Make Sense of Word Equations: Understanding the complexity of a 'simple' completion task at the learner's resolution. International Journal of Science Education, 31(15), 2021-2055.

46. Talanquer, V. (2007). Explanations and teleology in chemistry education. International Journal of Science Education, 29(7), 853–870.

47. Talanquer, V. (2011). Macro, Submicro, and Symbolic: The many faces of the chemistry "triplet". International Journal of Science Education, 33(2), 179-195.

48. Taskin, V., & Bernholt, S. (2014). Students' Understanding of Chemical Formulae: A review of empirical research. International Journal of Science Education, 36(1), 157-185.

49. Vygotski, L. S. (1997). Pensée et langage/Suivi de Commentaire sur les remarques critiques de Vygotski/de Jean Piaget (F. Sève, Trans. 3e éd. trad. revue ed.). Paris: La dispute.

50. Weininger, S. J. (1998). Contemplating the finger: Visuality and the Semiotics of Chemistry. HYLE–International Journal for Philosophy of Chemistry, 4(1), 3–27.

51. Wunderli, P. (2016). Ferdinand de Saussure : le signe. In Louis Hébert (dir.), Signo [en ligne]. Rimouski (Québec). Consulté à l'adresse http://www.signosemio.com/saussure/signe.pdf

CRÉDITS

AUTEUR(S)/AUTRICE(S)

Sophie Canac

Agrégée de chimie et enseignante-chercheuse en didactique de la chimie au Laboratoire de Didactique André Revuz (LDAR) avec pour domaine de recherche, entre autres, les registres sémiotiques utilisés en chimie.

RELECTURE SCIENTIFIQUE

Marie-Blanche Mauhourat

Inspectrice générale de sciences physiques

Rémi Le Roux

Professeur agrégé de chimie en classes préparatoires PC/PC* au lycée Sainte-Geneviève de Versailles. Ancien élève de l'École normale supérieure de Paris. Docteur en chimie moléculaire.

Baptiste Couet

Professeur agrégé de sciences-physiques, responsable éditorial de CultureSciences-Chimie en 2018-2019.

MISE EN LIGNE

Claire Vilain

Responsable éditoriale de CultureSciences-Chimie

LICENCE DU TEXTE DE L'ARTICLE

Creative Commons - Attribution - Pas d'utilisation commerciale - Pas de modifications

NOTES

1. Les représentations sémiotiques sont des « productions constituées par l'emploi de signes appartenant à un système de représentation qui a ses contraintes propres de signifiance et de fonctionnement » (Duval, 1993, p. 39).
2. « Pour Ferdinand de Saussure, le signe linguistique est pour ainsi dire double et se compose d'un élément conceptuel (signifié) et d'un élément "expressif" ou d'expression (signifiant) » (Wunderli, 2016, p. 1).
3. Mot, terme d'une langue considéré surtout sous le rapport de sa signification, de son individualité lexicale (petit, petite, petits sont trois formes d'un même vocable) (Source : Article Vocable de Larousse (https://www.larousse.fr/dictionnaires/francais/vocable/82341)).
4. Effacement d'une voyelle en fin de mot devant la voyelle commençant le mot suivant (ex : l'envie) (Source : Article Élision de Wikipédia en français (http://fr.wikipedia.org/wiki/%C3%89lision)).