

## Le rôle de l'isomorphisme dans la conception de la loi périodique de Dmitri Mendeleïev

**Résumé** L'isomorphisme a joué un rôle important dans la conception du tableau périodique des éléments chimiques par Dmitri Mendeleïev. Ce dernier a clairement souligné ce rôle dans son traité *Les principes de la chimie* et plusieurs autres publications. Cet article étudie les raisons qui ont mené à l'oubli rapide de l'isomorphisme mais montre également que cet oubli dépend principalement de l'importance et de la nécessité accordées aux poids atomiques dans le tableau périodique. Le désintérêt pour la cristallographie morphologique dans les domaines physico-chimiques, pourtant typique de la seconde moitié du XIX<sup>e</sup> siècle, n'est pas sans rapport avec le désintérêt de l'étude de l'isomorphisme.

**Mots-clés** Isomorphisme, poids atomiques, loi périodique des éléments, Mendeleïev, cristallographie.

**Abstract** **The role of isomorphism in the conception of the periodic law of Dmitry Mendeleev**  
Isomorphism played an important role in the conception of the periodic table of chemical elements by Dmitri Mendeleev. He has clearly underlined this role in his treatise *The Principles of Chemistry* and several other articles. This topic deals with the reasons that led to the rapid forgetting of isomorphism, but also that this forgetting depends mainly on the importance and necessity of atomic weights in the periodic table. The disinterest in morphological crystallography in the physico-chemical fields, although typical of the second half of the 19<sup>th</sup> century, is not unrelated to the disinterest in the study of isomorphism.

**Keywords** Isomorphism, atomic weights, periodic law of the elements, Mendeleev, crystallography.

Dmitri Ivanovitch Mendeleïev (1834-1907) connaissait soixante-trois éléments dont il a résumé les propriétés en autant de fiches descriptives. Il regroupait ces dernières dans le but de trouver une séquence chimiquement significative. Dans un court article [1], il diffusa le résultat de ses recherches à la communauté scientifique européenne sous la forme d'un tableau en ordonnant les éléments aux propriétés chimiques similaires. L'historien des sciences Henry M. Leicester (1906-1991) a mis en évidence le rôle de l'isomorphisme dans les travaux de Mendeleïev, comme l'une des propriétés lui ayant suggéré une analogie du comportement chimique [2] : « [Mendeleev] completed his studies in 1855 with a dissertation on isomorphism [3]. The close similarity of the crystals of isomorphous compounds, and the obvious similarities of the elements which formed them, evidently stirred his investigation and remained in his mind, for he returned to this subject when he developed the periodic law. In his great textbook, *The Principles of Chemistry* [4-7], he introduces his chapter on the periodic law with a long and detailed consideration of the topic of isomorphism, and from this proceeds to the deduction of the table itself. Such approach is seldom used in modern discussion of the law. »

La non-prise en compte du rôle joué par l'isomorphisme dans la conception de la loi périodique mise en avant par Leicester en 1948 persiste encore, à l'exception de quelques rares mentions (par exemple [8]), comme en témoigne le grand nombre d'articles célébrant l'œuvre de Mendeleïev parus à l'occasion du 150<sup>e</sup> anniversaire de sa découverte.

### L'isomorphisme : découverte et premiers succès

Lorsque Mendeleïev discute de l'isomorphisme lors de sa thèse de fin d'études universitaires en 1855, l'existence de solutions cristallines solides (cristaux mixtes) venait d'être publiée par Eilhard Mitscherlich (1794-1863) [9-10]. Ce dernier avait observé qu'une morphologie identique existait entre

des cristaux précipités depuis des composés capables de co-cristalliser, d'où l'introduction du terme « isomorphisme » pour désigner la même morphologie [10, p. 351].

La représentation polyédrique des molécules (intégrantes) et des atomes (molécules simples) était un point faible du modèle que René J. Haüy (1745-1822) avait proposé pour la constitution périodique des cristaux à l'échelle submicroscopique (cf. [8]). Pour Mitscherlich, les recherches sur la co-cristallisation de composés à composition chimique similaire ont été un champ de recherche fructueux pour surmonter la représentation polyédrique des atomes et des molécules. Les résultats de ces recherches se trouvent dans les travaux susmentionnés qui, à leur tour, s'appuient sur les recherches pionnières de Nicolas Leblanc (1742-1806) [11] et François S. Beudant (1787-1850) [12-13]. Ces derniers ont, dans leurs expériences, simultanément mis en solution des sels de même formule (par exemple des sulfates de Fe, Cu, Zn) et ont obtenu des cristaux de composition mixte, qui peuvent s'expliquer à la fois comme des sels doubles ou triples mais aussi comme une co-cristallisation de deux ou trois sels. Sans privilégier l'une des deux hypothèses, Beudant [13] a utilisé le terme mélanges chimiques pour ce type de cristaux, que William H. Wollaston (1766-1828) a défini comme des solutions solides à l'échelle atomique [14].

Conformément à l'interprétation de Wollaston, Mitscherlich pensait que des solutions solides ne sont possibles que grâce à la substitution atome par atome dans la structure des composés qui co-cristallisent. Lui et son professeur Jöns J. Berzelius (1779-1848) en ont donc déduit que si deux composés isomorphes, AR et BR (par exemple FeCO<sub>3</sub> et MgCO<sub>3</sub>), diffèrent dans leur composition chimique en raison de la substitution de l'atome A (Fe) par l'atome B (Mg), le rapport entre les poids atomiques de A et B peut être obtenu par l'égalité suivante :

$$= \frac{(\text{poids atomique de A})/(\text{poids atomique de B})}{(\text{masse de A combinée avec R})/(\text{masse de B combinée avec R})}$$

Utilisant largement cette hypothèse, Berzelius publia en 1828 le premier tableau des poids atomiques [15], avec des valeurs très proches de celles actuellement acceptées. Les quelques écarts substantiels sont imputables à l'incertitude sur l'état d'oxydation des éléments des composés considérés.

Sur ce concept, Louis Pasteur (1822-1895) a eu une contribution emblématique : il a démontré que les solutions solides de tartrate étaient à 50 % des mélanges mécaniques (racèmes) de cristaux énantiomorphes, c'est-à-dire spéculaires, du même tartrate [16].

## La loi périodique et la communauté scientifique

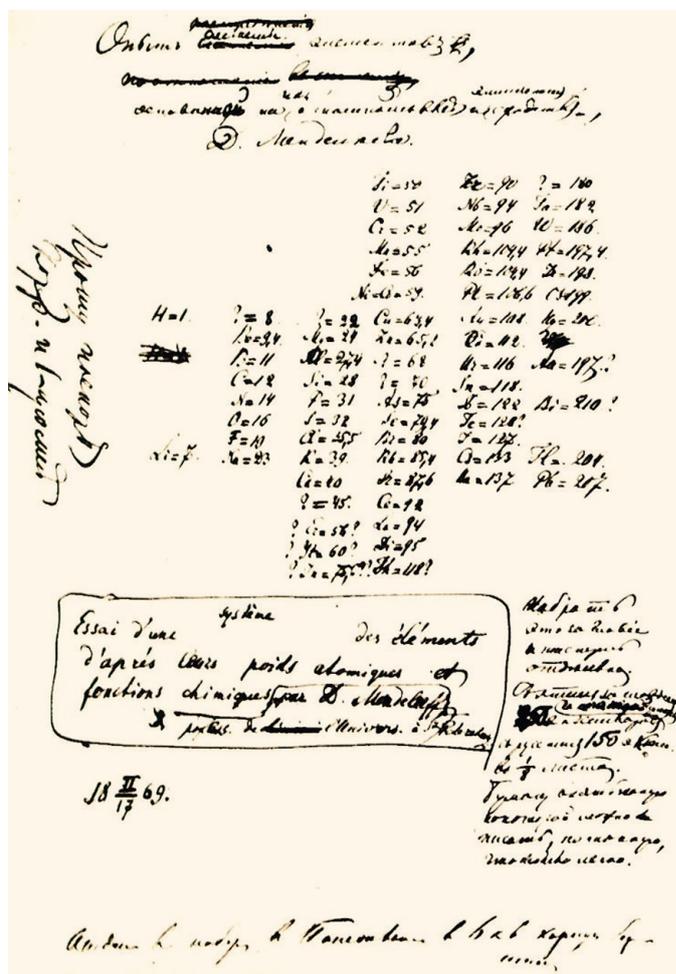
Lors de son long séjour en Europe de 1859 à 1861, Mendeleïev a eu l'occasion de rencontrer d'éminents scientifiques européens, notamment à l'Université de Heidelberg. En 1860, il a participé à la fameuse première conférence internationale des chimistes tenue à Karlsruhe, rencontrant Stanislas Cannizzaro (1826-1910), dont les propositions sur les poids atomiques eurent une grande importance pour l'élaboration de la loi périodique des éléments, comme l'a rappelé en 1888 Mendeleïev lui-même à l'occasion de la réception de la Médaille Faraday à Londres [17].

Mendeleïev profite de ses relations avec les scientifiques européens et, avant même de présenter sa découverte à la toute nouvelle Société russe de chimie, il envoie en février 1869 un court texte rédigé en français à cinquante collègues européens intitulé *Essai d'une (sic) système des éléments d'après leurs poids atomiques et fonctions chimiques* et contenant son tableau périodique avec quelques commentaires (voir figure). À ses collègues russes en revanche, il n'a envoyé que le tableau, sans commentaires, comme récemment publié par exemple dans les références [18-19]. Le 6 mars 1869, Mendeleïev présente un article substantiel de dix-huit pages sur la loi périodique des éléments à la réunion de la Société russe de chimie, lequel sera publié dans le premier numéro du magazine de la société [20].

À l'exception du brouillon reproduit ci-contre, aucune copie du court texte français n'a été retrouvée au cours de mes recherches. Ceci est à la base de deux publications en allemand : l'une contenait la traduction du texte précité [1] et l'autre ne rapportait que le tableau [21]. Dans [1], le tableau est précédé de la description succincte suivante du résultat (traduction de l'allemand) : « Si l'on organise les éléments en fonction de l'augmentation du poids atomique en rangées verticales de manière à ce que la série horizontale contienne des éléments analogues, eux-mêmes disposés en fonction de l'augmentation du poids atomique, on obtient la compilation suivante, à partir de laquelle des conclusions plus générales peuvent être tirées. »

Le tableau est suivi de huit conclusions schématiques, parmi lesquelles celles rapportées à la p. 462 de l'édition française du traité de Mendeleïev [7] : « 1° : Les éléments disposés d'après la grandeur de leur poids atomique présentent une périodicité des propriétés. 5° : La grandeur du poids atomique détermine le caractère de l'élément. 6° : Il faut attendre la découverte de plusieurs corps simples encore inconnus, ressemblant, par exemple, à Al et Si et ayant un poids atomique 65-75. 7° : La valeur du poids atomique d'un élément peut quelquefois être corrigée si l'on connaît ses analogues. Ainsi le poids atomique de Te n'est pas 128 mais il doit être compris entre 123 et 126. »

Le tableau de Mendeleïev a essuyé quelques critiques, notamment en ce qui concerne l'absence de références concernant



Ébauche en français du court texte sur la loi périodique que Mendeleïev a envoyé à cinquante collègues européens avant de présenter sa découverte à la Société russe de chimie (l'original est conservé au musée Mendeleïev à Saint-Petersbourg).

les tentatives antérieures de classification des éléments chimiques, mais a été accueilli avec enthousiasme, accentué par la découverte de nouveaux éléments chimiques tels que le gallium (1875), le scandium (1879) et le germanium (1886) dont Mendeleïev avait prévu l'existence. Le savant s'est défendu contre les critiques [22-23] dans la troisième partie d'un article rédigé en français [24, p. 538], où il réitère vigoureusement des arguments exprimés à deux autres occasions : dans son traité de chimie ([7], vol. 2, p. 463) et dans sa conférence Faraday [17]. Voici le texte tiré de [24] : « La première tentative de classification, en séries, de tous les éléments d'après la grandeur de leurs poids atomiques se rencontre chez Chancourtois (*Vis tellurique*) [22] et Newlands (*Law of the octaves*) [23]. Bien que ces savants aient établi des rapprochements entre les poids atomiques et les analogies connues jusque-là, la corrélation mutuelle et la succession des groupes qu'ils avaient créés ne pouvaient servir de base pour l'observation : leur classification avait l'apparence de quelque chose d'incomplet, de fragmentaire, et l'exposé de la question, comme cela arrive toujours dans une première tentative, manquait par trop de signification pour attirer l'attention sur le sujet. » Au terme de ces considérations, Mendeleïev déclare aussi explicitement qu'en 1869, il a construit sa loi périodique sans connaître les ouvrages des auteurs qui viennent d'être mentionnés. Hormis ces controverses, le scientifique avait dirigé des recherches sur le substrat culturel qui l'ont mené vers sa découverte. Elles n'apparaissent cependant que très tardivement dans la littérature, mise en lumière grâce à des historiens

des sciences. L'article issu de ces recherches a pourtant un rôle majeur : « *The name of Mendeleev is familiar to every chemist, and is at once associated with the periodic law, but few carry the connection any farther, or consider the factors which were responsible for the discovery of the law at this particular time and by this particular man* » [2].

## Isomorphisme et loi périodique

Dans l'article de 1869 [1], alors que le tableau se fait progressivement connaître hors de Russie, rien ne fait mention du chemin suivi par Mendeleïev pour aboutir à ce résultat. Il s'en déduit seulement que l'analogie entre les éléments chimiques était une directive importante. Conscient d'avoir été hermétique, même dans son vaste article de 1869 [20], il exposera en détail son raisonnement et le cheminement qui l'ont conduit à l'établissement du tableau périodique dans un article [25] qui sera immédiatement traduit en allemand [26] puis en français [27].

Dans les faits, ce cheminement logique était déjà lisible dans son traité *The Principles of Chemistry* [4], mais celui-ci restera méconnu en dehors de la Russie jusqu'en 1891, où il sera traduit en allemand [5] et en anglais [6]. Une traduction française [7] sera finalement réalisée en 1895 et 1897, à partir de la 5<sup>e</sup> édition russe, puis à leurs tours complétées par des notes provenant de la 7<sup>e</sup> et 8<sup>e</sup> édition russe [28]. En 2005, une sélection des écrits de Mendeleïev concernant la loi périodique a été publiée en anglais [29].

Dans le chapitre 15 de son traité, Mendeleïev introduit la loi périodique avec une discussion des propriétés mesurables des éléments chimiques prises en considération. L'auteur y met clairement en évidence le rôle de l'isomorphisme, propriété déjà objet de sa thèse à la fin de ses études universitaires en 1855 [3]. Mendeleïev lui-même, à travers des passages extraits du chapitre 15 (*Similitude des éléments et loi périodique*) du tome 2 de l'édition française de son traité, écrit : « *Les différents éléments peuvent, en effet, se ressembler par différents points. Ainsi Li et Ba ont plusieurs propriétés analogues à celles de Na ou de K ; sous d'autres rapports, ils se rapprochent de Mg ou de Ca. Il est donc évident que, pour trancher cette question, il faut se baser non seulement sur les propriétés qualitatives chimiques, mais aussi sur des signes quantitatifs, susceptibles d'être mesurés. Quand une propriété peut être mesurée, elle perd son caractère d'incertitude et devient un signe quantitatif. Au nombre des propriétés mesurables des éléments, ou de leurs composés correspondants, appartiennent :*

- a) *L'isomorphisme ou similitude des formes cristallines et la faculté qui en dépend de former des mélanges isomorphes.*
- b) *Le rapport des volumes des composés semblables des éléments.*
- c) *La composition de leurs combinaisons salifiables.*
- d) *Le rapport des poids atomiques des éléments.*

*Dans ce chapitre, nous allons exposer rapidement ces quatre points très importants pour la classification naturelle des éléments, qui facilite l'étude de ces derniers et de leurs combinaisons et qui a déjà été et peut encore être fertile en découvertes.*

*Au point de vue historique, l'isomorphisme fut la première méthode importante dont la démonstration ait amené la découverte de l'analogie entre les combinaisons de deux éléments différents. [...] Les formes cristallines pouvant être mesurées avec précision, on voit que la forme extérieure, ou le rapport moléculaire qui détermine leur structure cristalline, peut servir à apprécier les forces internes agissant entre les atomes, au même titre*

*que la comparaison des réactions, des densités de vapeur, etc. »* ([7], t. 2, p. 436-37).

Faisant suite à cet extrait, on trouve une description détaillée des caractéristiques de l'isomorphisme et l'analyse de différents exemples de substances isomorphes. Mendeleïev conclut : « *Tout ce qui précède montre que l'isomorphisme, c'est-à-dire la ressemblance des formes et la propriété de provoquer la cristallisation, peut servir de moyen pour découvrir des analogies dans la composition moléculaire* » (p. 443).

Il faut ici souligner que Mendeleïev a considéré comme preuve du comportement chimique analogue, non seulement la formation de cristaux mixtes (isomorphisme structurel), mais aussi le cas de cristaux à morphologie identique mais ne donnant pas de coprécipitation (isomorphisme morphologique). En d'autres termes, il a « inconsciemment » examiné le rôle du rayon ionique dans la formation des solutions solides, rôle qui ne sera clarifié qu'un demi-siècle plus tard [30-32], suite aux connaissances acquises grâce aux structures cristallines déterminées par diffraction des rayons X ; l'analyse des structures a permis d'établir que dans un cristal mixte, la vicariance entre les éléments chimiques exige que leurs rayons ioniques ne diffèrent pas de plus de 15-20 %.

À cet égard, Mendeleïev avait précisé, introduisant également le terme homéomorphisme, ce qui suit : « *La ressemblance des formes seule (homéomorphisme) ne suffit donc pas pour caractériser les corps isomorphes, elle doit être accompagnée de la propriété de produire des réactions semblables* » [7, t. 2, p. 438]. À la conférence Faraday [17], il cite le béryllium et l'aluminium comme exemples emblématiques d'homéomorphisme, éléments qu'il a refusé de considérer comme analogues dans leur comportement chimique, alors que l'opinion dominante à l'époque était que l'oxyde de béryllium (bromellite BeO, hexagonal) devait avoir la formule Be<sub>2</sub>O<sub>3</sub> car la morphologie de ses cristaux est très similaire à celle de l'alumine Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (corindon, trigonal).

L'article de 1871 rapporte les mêmes arguments [25] et illustre divers exemples dans lesquels l'isomorphisme est utilisé pour positionner correctement les éléments dans le tableau périodique et corriger les valeurs de poids atomiques rapportées dans la littérature. Le raisonnement suivant sur l'uranium, pour lequel il utilise le symbole Ur, paraît éclairant, selon la traduction française de 1879 : « *Les sels d'oxydure d'urane ne sont pas isomorphes avec les sels de magnésie, comme on pourrait s'y attendre en adoptant pour l'urane le poids atomique actuellement admis, et d'après lequel Ur serait analogue au fer* » [27].

Mendeleïev a écrit à plusieurs reprises que l'isomorphisme était une propriété très importante et mesurable des éléments chimiques et que cette propriété l'avait guidé dans la formulation de la loi périodique. De ce fait, pourquoi cette source d'inspiration a-t-elle été oubliée par ceux qui ont analysé la découverte du chimiste russe ? Une réponse peut être trouvée dans le chapitre 15 de son traité de chimie : après avoir analysé les propriétés a), b), c) et d) énumérées plus haut, Mendeleïev conclut que la disposition des éléments chimiques dans l'ordre croissant de leur poids atomique conduit automatiquement à une séquence où les éléments aux propriétés analogues sont côte à côte. Cette relation met aussi en évidence une périodicité des propriétés des éléments eux-mêmes. Une deuxième réponse pourrait aussi se trouver dans les courts articles [1, 21] sur la loi périodique des éléments, diffusés par la communauté scientifique internationale, dans lesquels le

chemin et la réflexion à la base de la découverte sont totalement absents.

Dans les *Principes de chimie*, Mendeleïev conclut de la façon suivante : « Il est donc tout naturel de chercher une relation entre les propriétés analogues des éléments d'une part et leurs poids atomique d'autre part. Telle est l'idée fondamentale qui oblige à disposer tous les éléments d'après la grandeur de leur poids atomique. Cela fait, on remarque immédiatement la répétition des propriétés dans les périodes des éléments. Nous en connaissons déjà des exemples :

$Fl = 19$  ;  $Cl = 35,5$  ;  $Br = 80$  ;  $I = 127$

$Na = 23$  ;  $K = 39$  ;  $Rb = 85$  ;  $Cs = 133$

$Mg = 24$  ;  $Ca = 49$  ;  $Sr = 87$  ;  $Ba = 137$

Les trois exemples ci-dessus permettent de saisir l'essence de la question. Les halogènes ont des poids atomiques plus petits que les métaux alcalins et ceux de ces derniers sont également inférieurs à ceux des métaux terreux. C'est pourquoi, en disposant les éléments d'après la grandeur croissante de leur poids atomique, on obtient une répétition périodique des propriétés. C'est ce qu'énonce la loi périodique : les propriétés des corps simples, comme les formes et les propriétés des combinaisons sont une fonction périodique de la grandeur du poids atomique » [7, t. 2, p. 461-62].

Une autre raison pour laquelle la contribution de l'isomorphisme à la conception de la loi périodique a largement été ignorée est sûrement liée au relâchement de la relation historique entre la cristallographie et les sciences physico-chimiques (cf. [33] et [34]). Cette fructueuse relation datant de la dernière partie du XIX<sup>e</sup> siècle s'affaiblira à la suite de l'avancée de la chimie et de la physique vers de nouvelles directions de recherche, qui se développeront de plus en plus indépendamment de l'étude des cristaux. Cependant, la contribution de l'isomorphisme à la base de la découverte fondamentale de Mendeleïev n'a pas échappé aux historiens des sciences attentifs [2] qui ont eu la clairvoyance d'analyser ce qu'il avait écrit dans son traité [4] qui, il ne faut pas l'oublier, était en voie de publication lorsque la loi périodique a été présentée à la communauté scientifique.

Cet article fait suite à la conférence donnée par l'auteur lors du colloque « De Lavoisier à Mendeleïev » du Groupe Histoire de la chimie (GHC) à Paris le 13 février 2020 (programme : [www.societechimiquedefrance.fr/IMG/pdf/ghc.2020.programme\\_colloque\\_13\\_fevrier-2.pdf](http://www.societechimiquedefrance.fr/IMG/pdf/ghc.2020.programme_colloque_13_fevrier-2.pdf)).

- [1] D.I. Mendeleev, Über die Beziehungen der Eigenschaften zu den Atomgewichten des Elements, *Zeitschrift für Chemie*, **1869**, 12, p. 405-06.  
[2] H.M. Leicester, Factors which led Mendeleev to the periodic law, *Chymia*, **1948**, 1, p. 67-74.  
[3] D.I. Mendeleev, Isomorphism in relation with correlations between crystal forms and composition, *Gornii Zhurnal*, **1856**, 8, p. 229-44 (en russe).  
[4] D.I. Mendeleev, *The Principles of Chemistry*, Obshchestvennaia pol'za, St. Petersburg, **1868-1871** (en russe).  
[5] D.I. Mendeleev, *Grundlage von Chemie*, Verlag von Carl Ricker, St. Petersburg, **1891**.  
[6] D.I. Mendeleev, *The Principles of Chemistry*, Longmans Green and Co, Londres, **1891**.  
[7] D. Mendéléeff, *Principes de Chimie*, vol. 1 et 2, Tignol, Paris, **1897**.  
[8] A. Dumon, De l'étude des pierres à la radiocristallographie, *L'Act. Chim.*, **2020**, 448, p. 39-46.  
[9] E. Mitscherlich, Über die Krystallisation der Salze in denen das Metall der Basis mit zwei Proportionen Sauerstoffe Verbunden ist, *Abhandlungen der Königlichen Akademie der Wissenschaften in Berlin 1818-1819*, **1819**, p. 427-37.

- [10] E. Mitscherlich, Sur la relation qui existe entre la forme cristalline et les propriétés chimiques. II<sup>e</sup> Mémoire sur les arsénates et les phosphates, *Annal. Chim. Phys.*, **1822**, XIX, p. 350-419.  
[11] N. Leblanc, De la cristallotechnie, ou essai sur les phénomènes de la cristallisation, *Journal de physique, de chimie, d'histoire naturelle et des arts*, **1802**, 55, p. 300-13.  
[12] F.S. Beudant, Recherches tendantes (sic) à déterminer l'importance relative des formes cristallines et de la composition chimique dans la détermination des minérales, *Annales des mines*, **1817**, 2, p. 1-32.  
[13] F.S. Beudant, Recherches sur les causes qui déterminent les variations des formes cristallines d'une même substance minérale, *Annales des Mines*, **1818**, 3, p. 239-74 et 289-344.  
[14] W.H. Wollaston, Observations sur le Mémoire de M. Beudant relatif à la détermination des espèces minérales, *Annal. Chim. Phys.*, **1817**, 7, p. 393-404.  
[15] J. Berzelius, Tables des poids atomistiques des corps simples et des leurs oxides, d'après les analyses les plus exactes et les plus récentes, *Annal. Chim. Phys.*, **1828**, 38, p. 426-32.  
[16] L. Pasteur, Sur les relations qui peuvent exister entre la forme cristalline, la composition chimique et le sens de la polarisation rotatoire, *Annal. Chim. Phys.*, **1848**, XXIV, p. 442-59.  
[17] D.I. Mendeleev, The periodic law of the chemical elements, *J. Chem. Soc., Trans.*, **1889**, 55, p. 634-56.  
[18] D. Pushcharovsky, Dmitri I. Mendeleev and his time, *Substantia*, **2019**, 3, p. 119-29, <https://riviste.fupress.net/index.php/subs/article/view/173/84>  
[19] D. Fauque, 1869 : Dmitri Mendeleïev publie la « loi périodique des éléments chimiques », *L'Act. Chim.*, **2019**, 436, p. 9-11, [www.lactualitechimique.org/1869-Dmitri-Mendeleiev-publie-la-loi-periodique-des-elements-chimiques](http://www.lactualitechimique.org/1869-Dmitri-Mendeleiev-publie-la-loi-periodique-des-elements-chimiques)  
[20] D.I. Mendeleev, The correlation between properties and atomic weights of the elements, *Journal of the Russian Chemical Society*, **1869**, 1, p. 60-77 (en russe).  
[21] D.I. Mendeleev, Versuch eines Systems der Elemente nach ihren Atomgewichten und chemischen Funktionen, *Journal für praktische Chemie*, **1869**, 106, p. 251.  
[22] A.E. Béguyer de Chancourtois, Mémoire sur un classement naturel des corps simples ou radicaux appelé vis tellurique, *C.R. hebd. séances Acad. Sci.*, **1862**, 54, p. 757-61.  
[23] J.A.R. Newlands, On the law of octaves, *Chemical News*, **1865**, 12 (Aug. 18), p. 83.  
[24] D.I. Mendeleev, Comment j'ai trouvé le système périodique des éléments, *Revue générale de chimie pure et appliquée*, **1899-1901**, vol. 1, p. 211-14 et 510-12 ; vol. 4, p. 533-46.  
[25] D.I. Mendeleev, Natural system of the elements and its application to prediction of properties of yet undiscovered elements, *Journal of the Russian Chemical Society*, **1871**, 3, p. 25-56 (en russe).  
[26] D.I. Mendeleev, Die periodische Gesetzmäßigkeit der chemischen Elemente, *Annalen der Chemie und Pharmacie*, **1872**, Supplementband 8, p. 133-229.  
[27] D.I. Mendeleev, La loi périodique des éléments chimiques, *Le Moniteur scientifique*, **1879**, XXI, p. 691-737.  
[28] F. Khantine-Langlois, *Dimitri Mendeleev et la classification périodique*, **2018**, <https://bibulyon.hypotheses.org/8482>  
[29] B.J. Jensen, *Mendeleev on the Periodic Law. Selected Writings, 1869-1905*, Dover Publications, Mineola (NY), **2005**.  
[30] F. Zamboni, The isomorphism of albite and anorthite, *American Mineralogist*, **1923**, 8, p. 81-85.  
[31] V.M. Goldschmidt, Geochemische Verteilungsgesetze der Elemente. VII. Die Gesetze der Kristallochemie, *Det Kongelige Norske Videnskabers Selskab Skrifter*, **1926**, 2, p. 1-117.  
[32] V.M. Goldschmidt, Geochemische Verteilungsgesetze der Elemente. VIII. Untersuchungen über Bau und Eigenschaften von Krystallen, *Det Kongelige Norske Videnskabers Selskab Skrifter*, **1926**, 8, p. 1-156.  
[33] G. Ferraris, Early contributions of crystallography to the atomic theory of matter, *Substantia*, **2019**, 3, p. 111-18, <https://riviste.fupress.net/index.php/subs/article/view/81>  
[34] S.H. Mausekopf, Crystals and compounds - Molecular structure and composition in nineteenth-century French science, *The American Philosophical Society*, **1976**, 66, p. 1-82.

**Giovanni FERRARIS,**

Professeur émérite, membre de Accademia Nazionale dei Lincei, Rome (Italie), Dipartimento di Scienze della Terra, Università degli Studi di Torino (Turin, Italie).

\* [giovanni.ferraris@unito.it](mailto:giovanni.ferraris@unito.it)