



## Chronologie de la découverte des éléments chimiques et cycles de Kondratiev

Ivan Brissaud et Monique Bernas

### Summary Discovery of chemical elements and Kondratiev long waves

At the end of the 18<sup>th</sup> century, modern chemistry is initiated by explaining oxidation and chemical reactions, ruling out alchemy and related concepts of matter. Then the discovery of elements proceeds up to now, via roughly 55 years long cycles. Each cycle is triggered by a cluster of scientific and technical innovations. The four cycles are found in phase with the four long waves proposed by Nikolai Dmitrijevitch Kondratiev (1892-1938) in 1926 who analysed economical fluctuations during the capitalist period.

In this paper we analyse the relations between the Kondratiev cycles and the chronology of the element discovery. The findings of radio-isotopes covers a shorter period. However it shows also a correlation with the chronology of element discovery.

**Mots-clés** Cycles économiques, Kondratiev, éléments chimiques.

**Key-words** Long waves, Kondratiev, element discovery.



Depuis l'Antiquité et jusqu'à la fin du XVIII<sup>e</sup> siècle, on ne connaissait guère qu'une vingtaine d'éléments chimiques (nom donné alors aux corps purs simples), dont le carbone, le fer, le cuivre, l'argent, l'or, le plomb et l'antimoine. Au Moyen-Age, les alchimistes travaillèrent à la fabrication de l'or dont ils rêvaient de percer le secret. Mais malgré tous leurs efforts, ni les chimistes ni les alchimistes ne furent en mesure d'obtenir le moindre atome d'or.

C'est au cours des années 1780 que Lavoisier montra le rôle de l'oxygène découvert peu avant par Priestley et Scheele. Rapidement, à partir de cette date, de nouveaux éléments seront mis en évidence. La raison de cette accélération est simple : c'est alors que débutent l'industrialisation de l'Europe grâce à de nouvelles techniques, et en particulier en France, la nouvelle organisation sociale. Dans ce contexte, se dessine lentement une activité « moderne » : la recherche scientifique, ce qui favorise un certain nombre d'études mettant à jour quelques « propriétés physiques et chimiques de la matière ». Certaines de celles-ci vont déboucher sur des inventions qui, à leur tour, donneront, peut-être, naissance à des innovations, exploitables ou non, et que l'on peut considérer comme l'aboutissement social et commercial de la recherche. Un exemple type est celui de l'électrolyse : les travaux de laboratoire de Volta portent, entre autres, sur la production de courant par deux métaux différents plongés dans un électrolyte, d'où la production d'électricité « dynamique » ; c'est la **découverte**. A la suite de Nicholson et Carlisle, Davy étudie qualitativement la dissociation électrolytique en 1806 : c'est l'**invention**. L'année suivante, ils

séparent le sodium à partir de la soude fondue par cette méthode. Les lois quantitatives de l'électrolyse seront énoncées par Faraday, ancien élève de Davy, en 1834. Cette technique, généralisée, a été appliquée dans l'industrie pour la production massive de chlore, de sodium, d'aluminium : c'est l'**innovation**.

Les innovations, que l'on peut définir *a priori* comme de nouvelles techniques, moyens de transport, de communication ou moyens de production énergétique, industries, se propagent dans les sociétés selon certains canaux. Elles diffusent par la renommée, les médias, les sociétés savantes... Tous ces mécanismes ont été bien étudiés et les modes de propagation diversement analysés ; l'*annexe* de cet article donne un modèle mathématique simple que nous avons exploité par la suite.

### Les cycles de Kondratiev

Le début du XIX<sup>e</sup> siècle ne voit pas seulement le développement des sciences physiques et chimiques ; les sciences économiques également se structurent pour essayer de maîtriser l'évolution des sociétés, et en particulier pour comprendre l'origine des crises économiques qui bouleversent périodiquement les populations [1]. Ainsi Say en 1803, puis Ricardo en 1817, et Malthus précédant Marx en 1820, publient leurs premiers ouvrages sur les crises. C'est en 1862 que Juglar annonce l'existence de cycles classiques d'une durée de 8-10 ans qu'il rattache à des problèmes monétaires. Ultérieurement, en 1926, l'économiste soviétique Kondratiev publie une étude montrant à partir de l'analyse de divers indicateurs (prix, taux d'intérêt...) que l'évolution de l'économie présente



# HISTOIRE DE LA CHIMIE

une structure en cycles d'une durée de 55 ans environ depuis l'établissement du régime capitaliste en Europe et aux États-Unis [2]. Schumpeter fait connaître le travail de Kondratiev et veut interpréter la signification de tels cycles de longue durée : ceux-ci, selon son schéma, sont générés par des grappes d'innovations dont l'apparition et l'exploitation sont réalisées à chaque fois que l'économie ralentit avant une récession [3]. Ces innovations exploitées par les « entrepreneurs » vont relancer la production et la consommation, diminuer le chômage, avant que leur rentabilité ne s'effiloche quelques années après, annonçant la crise suivante, et signifiant ainsi que les innovations précédentes sont dépassées et qu'il est nécessaire de choisir judicieusement de nouvelles idées parmi les nombreuses inventions offertes à ce moment-là. La crise, aboutissement du cycle, joue le rôle de purge qui élimine les obsolescences. Au cours de ces cycles, on appelle **phases A et B** respectivement le moment de l'expansion et de la récession.

En 1975, en Allemagne, Mensch, un disciple de Schumpeter, établit et publie une compilation des inventions et innovations marquantes de 1740 à 1950 [4]. Ces données ont été reprises et analysées par Marchetti [5]. La chronologie de ces innovations (*figure 1*) montre bien qu'elles apparaissent de façon cyclique, plus nombreuses à la fin des phases B de récession, juste avant la phase A d'expansion. Marchetti met bien en évidence que l'intervalle de temps entre invention et innovation se réduit particulièrement en fin de cycle (pour tous les cycles et sous l'influence de la nécessité !) et il rattache chaque cycle à un mode spécifique de production d'énergie [6]. Comme cela a été montré par Schumpeter, les cycles « classiques » de Juglar ont un impact moins marqué et modulent les cycles de Kondratiev. On vérifie que la « grande dépression » de 1873-1896 et la « grande crise » de 1929-1932 sont apparues au cours des phases B.

De son côté, Grubler reprend l'analyse fine de la diffusion d'innovations pour environ 250 processus recensés dans divers domaines économiques et sociaux aux États-Unis et d'une importance plus ou moins grande [7]. Après avoir modélisé dans chaque cas l'évolution (*équation II de l'annexe*), il détermine (à partir de la dérivée première en chaque point) les taux moyens de changements techniques, économiques et sociaux, en fonction de la date. Bien que la précision soit limitée, cette étude fait apparaître des plages de changements maximum centrés vers 1840, 1912 et 1970 lors d'une phase A (ou très proches), alors que les périodes de ralentissement précédant une nouvelle vague de changements se situent vers 1820, 1875 et 1930 au

début des phases B (*figure 1*). Ainsi, Grubler, par une méthode différente, confirme quantitativement la structure périodique des évolutions.

Les dates des crises proposées par Kondratiev [1] sont successivement : fin 1780/début 1790, 1844/1851, 1891/1896, 1940/1945, 1995/2000, ce qui correspond à la Révolution de 1789, celle de 1848, une crise économique mondiale, la seconde guerre mondiale, la crise économique mondiale récente. Les dates des maxima d'expansion [1] sont respectivement : 1810/1817, 1870/1875, 1914/1920, 1968/1973.

## Chronologie des découvertes

Nous nous proposons de mettre en relation avec ces cycles, la chronologie des découvertes des éléments chimiques. La courbe de la somme cumulée des éléments séparés jusqu'à ce jour est présentée sur la *figure 2*, en fonction de la date généralement acceptée pour la découverte. On constate que cette courbe présente, après une première vague, quatre structures représentées potentiellement par la courbe élémentaire  $N = f(t)$  définie dans l'*annexe*. Nous avons porté également sur cette figure les phases des cycles de Kondratiev et nous constatons à partir de la fin du XVIII<sup>e</sup> siècle une corrélation entre les 4 vagues et ces cycles. Comme les innovations techniques et scientifiques sont non seulement un moteur du développement économique, mais également un outil essentiel dans la recherche scientifique et en particulier pour la

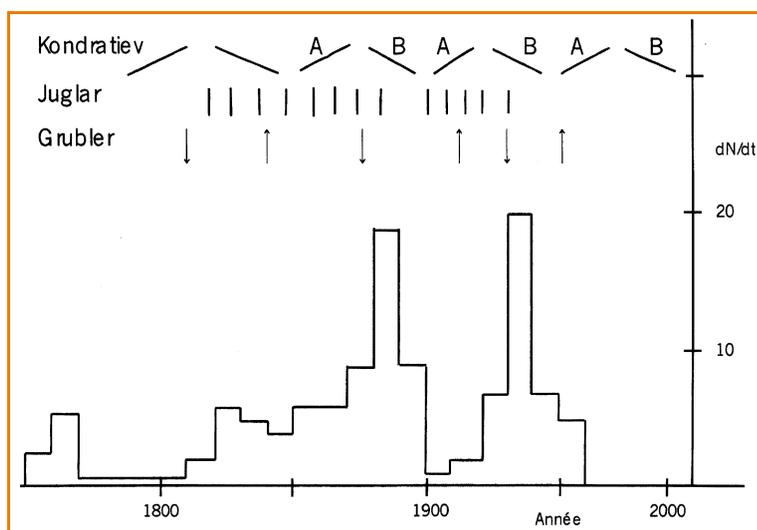


Figure 1 - En haut sont portées les phases A et B (expansion et récession) des cycles de Kondratiev. En-dessous, les barres verticales donnent les dates des cycles « classiques » de Juglar. L'histogramme présente le nombre dN/dt (cumulé sur 10 ans) des innovations majeures d'après Mensch [4]. Les flèches verticales donnent les maxima et minima déterminés par Grubler [7].

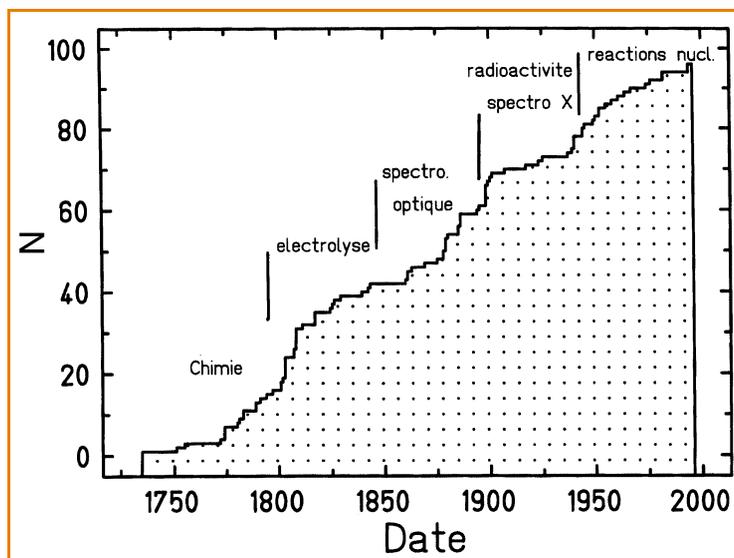


Figure 2 - Sous les phases A et B des cycles de Kondratiev sont données les sommes cumulées des éléments découverts en fonction de la date de la découverte.

recherche de nouveaux éléments, nous pouvons, dans le cadre de cette corrélation, examiner quelles sont ces innovations qui ont joué un rôle notable dans ces découvertes.

Précédant la période étudiée par Kondratiev, une première vague se devine sur la *figure 1* ; elle atteint son maximum vers 1785. Parallèlement, la notion d'élément se modifie ; c'est le départ de la chimie « classique » moderne sous l'influence, en particulier, de Lavoisier. La rigueur de son raisonnement et son exigence de quantitatif conduisent ce dernier à dénoncer la théorie du phlogistique qui avait certes supplanté l'alchimie ésotérique. Selon cette théorie, avancée par Stahl au début du XVIII<sup>e</sup> siècle, le phlogistique est un « principe » contenu dans les substances et qui s'échappe lors de leur combustion ou lors de la calcination de métaux. Cette conception erronée subsista jusqu'à ce que Lavoisier en formulât une autre. C'est alors que les techniques expérimentales s'enrichissent.

Comme nous l'avons déjà mentionné, la deuxième vague de découvertes culminant vers 1825, est celle de la mise en évidence des sodium, potassium, strontium, baryum... grâce à l'électricité. La pile électrique découverte par Volta en 1800 permet d'avoir des courants continus d'un usage aisé. On peut dire qu'alors la physique devient partenaire de l'analyse chimique. Puis Davy et Cruickshank découvrent les phénomènes électrolytiques en 1806 et Davy sépare par la suite de nombreux éléments. Simultanément, l'électrochimie donne à Berzelius

le moyen de découvrir le sélénium (1817) et le thorium (1828). Cette vague, qui correspond au premier cycle de Kondratiev, a été particulièrement fructueuse avec la découverte de 30 éléments. Parallèlement, dans le domaine économique, la machine à vapeur remplace peu à peu l'énergie humaine, animale ou hydraulique, et cette machine, accompagnée d'améliorations mécaniques, va augmenter les rendements de production dans les manufactures textiles et autres.

Vers 1859-1861, en Allemagne, les études de Kirchhoff et Bunsen débouchent sur les lois de la spectroscopie optique (émission et absorption), techniques qui permettent de caractériser les éléments. Presque simultanément, en 1869, Mendeleïev établit la fameuse classification périodique des 63 éléments connus à l'époque, selon leurs propriétés. Il prédit ainsi l'existence d'un certain nombre d'autres éléments et leurs propriétés. En conséquence, grâce à ces nouveaux savoirs, le césium (1860), le rubidium et le thallium (1861), l'indium (1863), le gallium (1875), le samarium (1879)... sont mis en évidence. Un grand nombre d'éléments « terres rares » sont identifiés dans cette seconde moitié du XIX<sup>e</sup> siècle, principalement par des chimistes suédois. La spectroscopie est un outil particulièrement efficace dans ce travail très complexe vu la similitude des propriétés de ces éléments. Ce deuxième cycle de Kondratiev est, comme le souligne Gilles reprenant l'analyse de Braudel, « *l'instant où désormais les techniques s'appuient sur la science* » [1]. Ceci se traduit par un fort développement des industries sidérurgiques et chimiques et avec l'arrivée du chemin de fer qui apporte un réseau de transport plus étendu avec toutes les conséquences économiques que l'on sait, spécialement pour les échanges commerciaux. Cependant, le nombre d'éléments mis en évidence à cette époque n'est que de l'ordre de 17.

Une remarque historique s'impose ici : en 1875, le français Lecoq de Boisbaubran, en 1879 le norvégien Nilson et en 1886 l'allemand Winkler, découvrent chacun un élément inconnu différent. Ces 3 éléments seront baptisés respectivement gallium, scandium et germanium, pour bien mettre en relief la nation du découvreur ! Ce chauvinisme se manifeste notamment durant les phases B de récession du 2<sup>e</sup> cycle de Kondratiev (*figure 1*) et en particulier après le conflit de 1870 qui a marqué le choc des impérialismes et alors que l'Europe se dirige vers la crise des années 1890.

Un demi-siècle plus tard, c'est le début de la physique moderne : Röntgen découvre les rayons X en 1895, Becquerel la radioactivité, propriété caractéristique de certaines substances (1896). On



# HISTOIRE DE LA CHIMIE

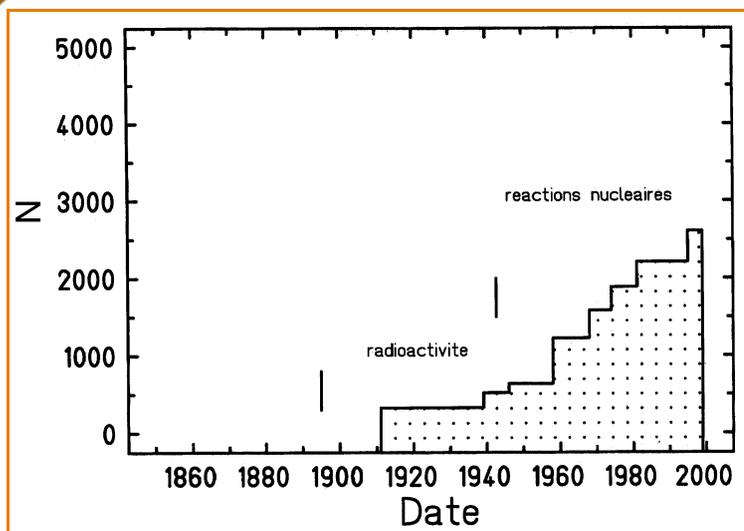


Figure 3 - Somme cumulée des radio-isotopes découverts depuis 1934 en fonction de la date de découverte avec le cycle de Kondratiev associé.

peut, grâce à ce phénomène, identifier la présence d'éléments inconnus ; dans la foulée, Pierre et Marie Curie isolent le radium et le polonium (1898) ; puis c'est au tour de l'actinium, du radon... jusqu'au francium. Moseley relie les fréquences des raies X au nombre atomique Z et donne en 1913 le moyen d'identifier les éléments par diffraction cristalline : l'hafnium, le rhénium... sont mis en évidence en 1923 et un total de 19 éléments est découvert lors de ce cycle qui voit l'introduction générale de l'électricité dans la vie des habitants et dans l'industrie des pays développés. Simultanément et parmi les autres innovations majeures, l'économie est bouleversée par la venue et le perfectionnement des transports automobiles et aéronautiques.

Enfin, entre 1931 et 1942, sont ébauchés puis construits pour les besoins de la physique nucléaire (et de la guerre), les premiers accélérateurs de particules et les réacteurs à neutrons ; ces outils qui se développent rapidement après la seconde guerre mondiale permettent, au fil de l'amélioration de leurs performances, de produire de nouveaux éléments par des réactions nucléaires de plus en plus complexes. Au cours de ce 4<sup>e</sup> cycle, 19 éléments sont identifiés (sur les 31 éléments radioactifs découverts entre 1937 et 1997) en commençant par le technétium, le plutonium, le neptunium... Les techniques utilisées dans ces recherches font appel principalement à la physique puisque les éléments sont identifiés par leurs chaînes de décroissance alpha. Elles sont passées en revue dans un article de Peter Armbruster qui a lui-même, avec ses collaborateurs, produit et identifié six nouveaux éléments [8]. Dans le domaine

économique, il faut souligner le rôle important au cours de cette période de l'énergie nucléaire qui permet à nos sociétés de se dégager de l'usage excessif des énergies fossiles. La radioactivité et les équipements de physique nucléaire ont contribué également de façon décisive aux progrès de la médecine tant en diagnostic qu'en thérapie et des industries des matériaux.

En résumé, on connaissait 31 éléments à la fin du XVIII<sup>e</sup> siècle, 57 au milieu du XIX<sup>e</sup>, 82 à la fin de ce dernier et 97 en 1949.

Mais dans les laboratoires de physique nucléaire, on ne fait pas seulement la chasse aux éléments. Grâce aux accélérateurs de particules et aux réacteurs, on peut produire également des isotopes radioactifs qui ne sont pas ou ne sont plus présents sur Terre. Historiquement, c'est Frédéric Joliot et Irène Joliot-Curie qui, en 1934, ont créé le premier radio-isotope (le phosphore 30) en découvrant la radioactivité artificielle. Depuis cette date jusqu'en 1999, environ 2 460 nucléides artificiels ont été produits. L'historique de ces travaux peut être trouvé dans l'article de Peter Armbruster et Monique Bernas impliqués dans ces recherches [9]. La somme cumulée de ces 2 460 noyaux, en fonction de la date de découverte, est présentée sur la *figure 3* avec les phases des cycles de Kondratiev. Malgré la durée assez brève de ces travaux, on constate encore une fois une corrélation entre la chronologie des découvertes et les deux derniers cycles de Kondratiev.

## Conclusions

En conclusion, dans cette note nous avons voulu corréler depuis la fin du XVIII<sup>e</sup> siècle la découverte d'éléments et de radio-isotopes avec l'activité économique : au cours de cette période de deux cent ans sont apparues, en différentes vagues, des grappes d'innovations scientifiques et techniques. Lors de chacune de ces vagues, de nouveaux savoirs ont diffusé dans le monde scientifique et ces savoirs ont conduit à la découverte de nouveaux éléments. Et chaque vague de découvertes s'étale sur approximativement 55 ans en accord avec la durée des cycles proposés par Kondratiev.

Les innovations qui sont à l'origine des découvertes d'éléments se situent toujours en début d'un cycle en phase A : la pile de Volta en 1800, le travail de Kirchhoff et Bunsen en 1859, la radioactivité



en 1896, la maîtrise des accélérateurs et réacteurs après la seconde guerre mondiale, alors que les pics des innovations majeures débouchant sur un bouleversement économique ou social se placent à la fin des cycles, en phase B [4]. Ces constatations sont en parfait accord avec « la première loi empirique » avancée par Kondratiev [1].

L'intervalle de temps au cours duquel s'effectue le plus grand nombre de mises en évidence d'éléments débute pour chaque cycle au cours de la phase A, phase de prospérité, et dure jusqu'au moment où s'inverse la tendance économique avant de s'achever en B en approchant de la crise. Au creux de celle-ci, il n'y a pas de découverte. On peut en déduire que les innovations intervenant dans un processus à « caractère purement scientifique et fondamental » sont exploitées préférentiellement lors d'une période socialement stable et paisible durant laquelle la recherche scientifique peut se développer.

Les nouveaux savoirs exploités dans ces mises en évidence s'appliquent de préférence à des éléments ayant des propriétés atomiques voisines, c'est-à-dire

appartenant à une même colonne du tableau périodique de Mendeleïev. Ceci se vérifie pour les alcalins, les alcalino-terreux et les gaz rares. Évidemment, quand l'exploration d'une famille est achevée, le processus de découverte se tarit et il y a l'effet de saturation que l'on constate sur la *figure 2* pour chaque cycle. Pour les éléments lourds, radioactifs, les méthodes relèvent de la physique nucléaire ; les noyaux sont produits dépouillés de leur cortège électronique.

Ce travail se veut donc à la fois une confirmation et une justification de la structure cyclique du développement technique et économique. Les grappes d'innovations ont une incidence sur la découverte d'éléments ou de radio-isotopes mais, plus généralement, sur beaucoup d'autres domaines scientifiques fondamentaux ou appliqués, économiques et sociaux, comme cela a été montré par ailleurs. On doit aussi rappeler qu'une analyse historique dans le cadre des cycles de Kondratiev n'est malheureusement possible qu'*a posteriori* comme l'a écrit Braudel [10]. Faut-il s'attendre à

## Annexe

Le modèle de diffusion proposé en 1961 a été utilisé avec succès en économie, biologie, géologie, ethnologie, médecine.

Les hypothèses sont les suivantes :

- il n'y a qu'une seule innovation intervenant simultanément,
- la statistique est suffisante,
- durant la plage de temps choisie les conditions restent identiques.

Quand une innovation déjà acquise par N personnes se propage à l'instant t, la variation du nombre de personnes adoptant cette innovation  $dN/dt$  est proportionnelle au nombre de personnes N (qui en font la publicité) et au nombre  $(N_m - N)$  de personnes restantes pouvant choisir cette innovation où  $N_m$  est le nombre maximum d'individus pouvant être intéressés :

$$dN/dt = k.N.(N_m - N) \quad (\text{équation I})$$

ce qui donne :

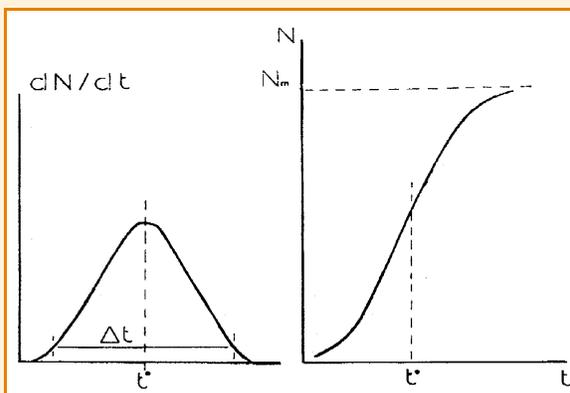
$$N = N_m/[1 + \exp(-at + b)] \quad (\text{équation II})$$

Si  $t^\circ$  est le temps auquel l'amplitude de l'évolution est maximum et  $\Delta t$  est la durée de la diffusion, c'est-à-dire l'intervalle de temps pour que N passe de 10 % à 90 % du maximum  $N_m$ , en conséquence  $a = 4,39/\Delta t$  et  $b = 4,39.t^\circ/\Delta t$ ,  $t^\circ$  et  $\Delta t$  étant extraits des courbes expérimentales.

La courbe  $dN/dt$  a une forme en cloche

typique et la courbe N a une forme en S caractéristique comme le montrent les figures ci-dessous.

Ce formalisme a été appliqué à un grand nombre de domaines. Un exemple classique est la propagation des épidémies. Marchetti a pu ainsi rendre compte des épidémies de peste dans divers pays européens grâce aux nombreuses statistiques concernant ces fléaux. Il s'en est servi par ailleurs pour analyser quelques 2 000 exemples dans différents domaines d'activité [11]. Toutes ces études ont convaincu de la validité du modèle. Celui-ci, appliqué aux deux cas analysés ici, rend parfaitement compte des données utilisées.





# HISTOIRE DE LA CHIMIE

l'arrivée de nouveaux éléments encore plus lourds ? L'existence d'éléments de charge atomique supérieure à 110 se heurte à l'obstacle des lois fondamentales de la physique (comme la loi de Coulomb) et il y a vraisemblablement une limite au nombre d'éléments assez voisine de 112 ; il semble que nous devrions dans l'avenir nous contenter d'explorer le champ des isotopes encore inconnus.

## Remerciements

Nos collègues chimistes, les professeurs M. Genet, M. Lefort et P. Rigny, nous ont adressé aimablement des commentaires ; qu'ils soient certains de notre gratitude. Notre reconnaissance va à C. Bués qui nous a transmis des données sur les dates des découvertes. Nous avons eu avec C. Marchetti plusieurs discussions fort enrichissantes et nous l'assurons ici de tous nos remerciements.

## Notes

- Luft R., *Dictionnaire des corps purs simples de la chimie*, éd. Cultures et Techniques, **1997**.
- Certaines précisions historiques ont été extraites des deux *Histoire de la chimie* de :
  - a) Wojtkowiak B., *Technique et Documentation*, Lavoisier éditeur, Paris, **1987**.
  - b) Bensaude-Vincent B., Strenfers I., *La Découverte* éditeur, **1993**.

## Références

- [1] Gilles Ph., *Crises et cycles économiques*, Collection Cursus, A. Colin éd., **1996**.
- [2] Kondratiev N.D., *Die langen wellen der Konjonctur*, *Archiv für Sozialwissenschaft und Sozialpolitik*, **1926**, 56, p. 573.
- [3] Schumpeter J., *Business cycles, Theoretical, Historical and Statistical Analysis of the capitalist process*, Mc Graw Hill Editor, **1939**.

- [4] Mensch G.O., *Das technologische Patt*, Umschau Verlag Frankfurt, **1975**.
- [5] Marchetti C., *Society as a Learning System*, Syracuse Scholar ed., **1980**, 21.
- [6] Brissaud I., *Le développement de l'énergie nucléaire est-il lié au cycle de Kondratiev ?*, *Revue Générale Nucléaire*, **2001**, 2, p. 69.
- [7] Grubler A., *Long-Term Patterns and Discontinuities*, *Technological Forecasting and Social Change*, **1991**, 39, p. 159.
- [8] Ambruster P., *Exposé à la conférence : Centenaire de la radioactivité artificielle*, La Sorbonne, **2000**.
- [9] Ambruster P., Bernas M., *Contribution à Œuvre et Engagement de Frédéric Joliot-Curie* (par M. Bordry, P. Radvanyi), EDP Sciences, **2001**, p. 35.
- [10] Braudel F., *Civilisation matérielle, économie et capitalisme*, A. Colin Ed., **1979**.
- [11] Marchetti C., *Trends and Cycles of Change*, *Proc. of World Symposium on Computing in the Gas Industry*, **1999**, et références dans ce texte.



I. Brissaud

### Ivan Brissaud

est directeur de recherches honoraire au CNRS\*

### Monique Bernas

est directrice de recherches au CNRS\*\*



M. Bernas

\* 4, allée du Plariol, 05240 La Salle les Alpes.

E-mail : [Ivan.brissaud@wanadoo.fr](mailto:Ivan.brissaud@wanadoo.fr)  
\*\* Institut de Physique Nucléaire, 91406 Orsay Cedex.  
E-mail : [Bernas@ipno.in2p3.fr](mailto:Bernas@ipno.in2p3.fr)

