Bull. Soc. R. Sci. Liège, 2026, **95**(2), 8–15 *Extended conference abstract*
doi:10.25518/0037-9565.12685

De la synthèse de l'urée à la destruction des PFAS : deux siècles de sérendipité en chimie

Bernard LEYH

Université de Liège, Département de Chimie, UR MolSys,
Quartier Agora, Allée du 6-Août 11, 4000 Liège 1
Correspondance à : Bernard.Leyh@uliege.be

Article publié selon les termes et conditions de la licence Creative Commons CC BY 4.0.

Communication invitée présentée au colloque annuel de la Société Royale des Sciences de Liège sur « Explorations scientifiques : hasard et sérendipité », Université de Liège (Belgique), 27 novembre 2026.

Résumé

La sérendipité imprègne toute l'histoire de la chimie. Une sélection d'exemples des 200 dernières années illustre comment l'exploitation judicieuse de résultats expérimentaux inattendus a ouvert la voie à des programmes de recherche fructueux et au développement de secteurs industriels florissants.

Mots-clés : sérendipité, anomalie, réaction chimique, chimie organique, synthèse de molécules, polymérisation, catalyse, PFAS, fullerènes

Abstract

From the Synthesis of Urea to the Breakdown of PFAS: Two Centuries of Serendipity in Chemistry. Serendipity has been a constant feature throughout the history of chemistry. A selection of examples from the last 200 years illustrates how the judicious exploitation of unexpected experimental results has paved the way for fruitful research programmes and the development of thriving industrial sectors.

Keywords: serendipity, anomaly, chemical reaction, organic chemistry, molecular synthesis, polymerisation, catalysis, PFAS, fullerenes

1. Introduction et contexte

La sérendipité fait partie intégrante de l'histoire de la chimie. Ce terme un peu étrange est la francisation d'un néologisme anglais, *serendipity*, introduit en 1754 par l'écrivain et politicien britannique Horace Walpole dans une lettre à un ami à qui il confie avoir fait une découverte à propos d'un tableau par un heureux mélange de hasard et de réflexion basée sur ses connaissances historiques, à la manière des trois héros d'un conte persan, *The Three Princes of Serendip*, qui, au cours de leurs pérégrinations, font continuellement « des découvertes par accident et par sagacité de choses dont ils n'étaient pas en quête ». Le mot a été francisé assez récemment

(2008) [1] et l'Académie française, tout en l'admettant, lui préfère le vocable de « fortuité » [2] qui, on en conviendra, prive le concept d'une part de son exotisme.

« Accident et sagacité », ces deux aspects indissociables sont souvent résumés par une citation célèbre de Louis Pasteur, qui avait lui-même découvert par sérendipité la propriété de chiralité, citation extraite d'un discours tenu à Douai en 1854, un siècle après Walpole : « . . . souvenez-vous que dans les champs de l'observation le hasard ne favorise que les esprits préparés. » [3]

La sérendipité peut consister en une observation inattendue due à la chance ou en un « accident » qui contrarie les prédictions ou les espoirs du chercheur. Il est tentant de négliger une telle observation pour se focaliser sur les lignes directrices initiales de son programme de recherche et un « esprit préparé » est donc nécessaire pour évaluer l'importance de l'anomalie et reconnaître son potentiel, en établissant les liens conceptuels indispensables qui lui donnent sens et la valorisent. Nous en verrons plusieurs exemples dans la suite.

2. Catégorisation : différents types de sérendipité et exemples en chimie

En chimie comme dans d'autres disciplines, les contextes de découvertes fortuites peuvent être très variés. P. Van Andel a ainsi identifié 17 situations-types différentes ("*patterns*") menant à de telles découvertes [4]. R. Friedel, quant à lui, propose trois grandes catégories, désignées en référence à des découvreurs célèbres [5]. Ces catégories ne sont évidemment pas étanches : les situations réelles peuvent, dans des mesures diverses, recouvrir plusieurs catégories.

(i) La sérendipité colombienne : la recherche d'une chose conduit à en découvrir une autre.

(ii) La sérendipité archimédienne : la solution d'un problème résulte d'une observation fortuite dans un autre contexte.

(iii) La sérendipité galiléenne : de nouvelles techniques d'investigation permettent de faire des observations surprenantes.

Dans la suite de cet article, nous allons examiner, en utilisant cette clé de lecture, quelques exemples emblématiques de sérendipité en chimie. Il ne s'agit bien entendu que d'un florilège très incomplet. La chimie est la science des réactions grâce auxquelles un nombre *a priori* illimité de molécules et de matériaux aux propriétés variées peuvent être synthétisés. Comme le veut l'expression consacrée, la chimie crée ainsi son propre objet. Il n'est donc pas étonnant que la plupart des exemples qui vont être cités concernent la synthèse de molécules ou de matériaux qui n'avaient pas été prévus au départ mais dont l'importance a été reconnue par les chimistes et qui ont souvent mené à des applications industrielles à haute valeur ajoutée dans les domaines de la chimie fine, de la pharmacologie et des matériaux fonctionnels.

2.1. La sérendipité colombienne : la situation la plus fréquente en chimie

La chimie organique naît en 1828. Alors qu'il cherchait à préparer un sel inorganique, le cyanate d'ammonium NH_4OCN, Friedrich Wöhler obtint, à la place du produit attendu, un

composé, l'urée, $NH_2(CO)NH_2$, de même formule moléculaire, reconnu jusqu'alors comme d'origine naturelle et donc organique. On considère généralement que cette découverte inattendue sonne le glas de la théorie du vitalisme, quoique l'histoire soit en fait plus complexe [6]. Cette découverte met aussi en évidence un autre aspect très important de la chimie, l'isomérie.

En 1856, William Henry Perkin réalisa la synthèse d'un colorant célèbre, la mauvéine, alors qu'il cherchait à synthétiser la quinine, un agent antipaludique reconnu [7]. Dans l'ignorance des structures moléculaires, la voie de synthèse qu'il avait proposée ne pouvait que se solder par un échec, mais il n'était pas prévisible qu'il obtienne un précipité qui, dissous dans le méthanol, fournit une solution d'un mauve intense qui se fixe de manière persistante sur la soie. Perkin reconnut rapidement l'importance de sa découverte et se lança directement dans une aventure industrielle. L'industrie des colorants de synthèse était née.

En 1938, Roy Plunkett, chercheur chez DuPont de Nemours dans l'État du Delaware, synthétise des réfrigérants de la famille des chlorofluorocarbures, les célèbres fréons. C'est dans ce contexte qu'il observe la polymérisation inattendue du tétrafluoroéthylène en polytétrafluoroethylène (PTFE), commercialisé ensuite sous le nom de Téflon® [8]. Il est important de noter qu'à cette époque, le concept de macromolécule proposé par Hermann Staudinger est bien établi. Mais la sérendipité ne s'arrête pas là. Le contexte historique va être déterminant. Dans le cadre du Projet Manhattan, l'inertie chimique du PTFE le rendra indispensable au procédé d'enrichissement en uranium 235 à partir d'hexafluorure d'uranium gazeux, composé très corrosif. C'est ensuite dans les années 1950 et 1960 que se développèrent les multiples applications de ce polymère (cuisine, médecine, électronique, habillement, . . .). De ces développements également, la sérendipité n'est pas absente.

Charles Pedersen était en 1938 un jeune collègue de Roy Plunkett chez DuPont. Un quart de siècle plus tard, toujours chez DuPont, il cherche à synthétiser des ligands multidentés phénoliques mais obtient à la place un sous-produit cristallin blanc qui se révèle être le premier éther-couronne, le dibenzo-18 crown-6 [9]. C'était le début d'une longue aventure, celle de la chimie supramoléculaire hôte-cible, qui sera récompensée en 1987 par l'attribution du prix Nobel de chimie à Charles Pedersen, Donald Cram et Jean-Marie Lehn.

La découverte par Karl Ziegler des catalyseurs organométalliques pour la polymérisation coordinative des oléfines est une longue histoire qui s'étend sur plus de vingt ans et illustre parfaitement l'interaction entre l'« esprit préparé » et les résultats inattendus [10]. La ligne directrice des travaux fondamentaux de Karl Ziegler et de ses chercheurs était la recherche de nouvelles techniques de synthèse menant à la formation de liaisons carbone-carbone en faisant appel à la chimie organométallique. Ces années de recherche, qui ont culminé avec la synthèse de polyéthylène haute densité dans les années 1950, furent émaillées de plusieurs observations inattendues qui semblaient de prime abord des anomalies mais dont Ziegler a reconnu le potentiel. Ce succès, dont l'exploitation industrielle ultérieure fut phénoménale, résulte de la combinaison d'une démarche logique, d'une approche systématique et de l'exploitation adéquate de résultats surprenants. Karl Ziegler a obtenu, avec Giulio Natta, le prix Nobel de chimie en 1963.

Ce type de catalyseur Ziegler-Natta a permis à Hideki Shirakawa de synthétiser un film mince de polyacétylène qui s'est révélé semiconducteur [11]. Les recherches ultérieures sur les

matériaux plastiques conducteurs de l'électricité, menées avec Alan Heeger et Alan MacDiarmid – tous trois ayant obtenu le prix Nobel de chimie en 2000 – ont ouvert la voie à l'électronique organique dont les diodes électroluminescentes organiques (OLED) constituent un exemple. C'est en fait une erreur de surdosage important du catalyseur qui a permis d'atteindre ce résultat. Ce type de sérendipité illustre le « principe de négligence modérée » évoqué par le biophysicien Max Delbrück [12].

La sérendipité ne concerne pas que les recherches les plus célèbres ayant mené à des prix Nobel. Les chimistes de synthèse y sont fréquemment confrontés comme le montrent quelques publications récentes [13–15]. L'article de revue de Uwe Rosenthal sur 50 années de recherche en chimie organométallique [16] pourrait ainsi être mis en parallèle avec la théorie proposée en 1989 par Kantorovich et Ne'eman, dans leur article *« Serendipity as a source of evolutionary progress in science »* [17]. Ces auteurs ont proposé un parallèle entre les mutations génétiques aléatoires et les observations inattendues, la communauté scientifique assumant alors, à l'instar du milieu naturel en biologie, la fonction de sélection.

2.2. Détruire les PFAS : un exemple très récent de sérendipité archimédienne

Le polymère PTFE, évoqué plus haut, fait partie d'une famille de composés désignés par l'acronyme PFAS (*per- and polyfluoroalkyl substances*) dont les domaines d'application sont multiples mais qui ont mené à une contamination environnementale dont on a relevé seulement assez récemment les effets néfastes sur la santé humaine. D'autre part, le fluor est un élément essentiel du tableau périodique qui intervient dans la composition de nombreuses substances essentielles, entre autres en pharmacologie. Or, la source principale de fluor est la fluorite (CaF_2) dont les quantités disponibles sont limitées. Le groupe de recherche dirigé par Véronique Gouverneur à l'Université d'Oxford a récemment découvert par sérendipité une méthode mécano-chimique pour, d'une part, décomposer des PFAS et, d'autre part, récupérer le fluor sous forme d'ions fluorure [18–20]. En cherchant à extraire le fluor de la fluorite dans un broyeur à billes en acier inoxydable muni de joints en téflon (PTFE), en présence de phosphate de potassium, ces chercheurs ont observé, à leur grande surprise, un rendement de récupération de fluorure supérieur à 100 %. L'excès provenait en fait de la dégradation mécano-chimique du téflon.

2.3. La découverte des fullerènes : une contribution de la sérendipité galiléenne

La découverte des fullerènes illustre le rapport entre sérendipité et l'utilisation de techniques analytiques de pointe [5, 21]. À l'instar de Galilée et de ses télescopes, l'astrochimiste Harold Kroto a, pendant de nombreuses années, scruté l'espace interstellaire pour y découvrir, grâce à la spectroscopie rotationnelle des micro-ondes, des molécules constituées de longues chaînes linéaires de carbone. Ses recherches l'ont mené à collaborer avec Richard Smalley et Robert Curl de l'Université Rice (Texas), qui avaient construit un appareil pour produire des agrégats par évaporation laser de cibles appropriées et analyser leur composition par spectrométrie de masse à temps de vol. C'est en utilisant une cible de graphite dans cet appareil que fut découverte, de manière totalement inattendue, l'existence des molécules de C_{60} et C_{70} dont la structure

tridimensionnelle fut établie par la suite. La citation suivante de Kroto, qui a partagé avec Smalley et Curl le prix Nobel de Chimie en 1996, témoigne du rôle joué par l'association d'un « esprit préparé » par de nombreuses années de recherche et l'utilisation des techniques expérimentales adéquates :

> *« It was the marriage of ideas resulting from the discoveries of carbon chains in space with the recognition that the cluster beam technique might offer laboratory support for their circumstellar origin that in 1985 resulted in the serendipitous discovery that the molecule not only existed but that it self-assembled. »* [21].

3. Conclusion

A priori, la sérendipité semble s'opposer à la conviction des scientifiques de contribuer à une entreprise purement rationnelle. Dans le domaine de la synthèse en chimie organique, par exemple, l'optimisation basée sur des calculs quantiques et sur l'apprentissage automatique est de plus en plus privilégiée dans un but d'économie et de respect de l'environnement [22]. Il n'en reste pas moins vrai que le progrès des connaissances résulte de la confrontation de nos idées, de nos concepts et de nos théories à la réalité du monde, qui nous réserve bien des surprises. La sérendipité est restée longtemps absente de la réflexion des philosophes des sciences dans la mesure où ceux-ci, à la suite de Karl Popper [23], établissaient une séparation claire entre le contexte de la découverte, où la chance, l'intuition, la créativité et les interactions sociales sont censées jouer un rôle déterminant, et celui de la justification, régi par la logique. On notera toutefois que, dès les années 1960, Thomas Kuhn avait, sans faire explicitement référence au concept de sérendipité, mis en lumière le rôle central des anomalies dans l'avènement de révolutions scientifiques menant à un changement de paradigme [24]. Les exemples que nous avons présentés, même s'ils ne sont pas nécessairement tous révolutionnaires, illustrent toutefois l'importance des anomalies dans la quête scientifique. À l'heure actuelle, il est heureux de constater que des chercheurs en philosophie des sciences cherchent à mieux cerner les relations entre « accident » et « sagacité », à définir ce qu'est un « esprit préparé » et à comprendre son fonctionnement, pour ainsi établir une épistémologie de la sérendipité qui bâtisse un pont entre les processus de découverte et de justification [25–28].

Informations supplémentaires

Identifiant ORCID de l'auteur

0000-0001-8447-5836 (Bernard LEYH)

Conflits d'intérêt

L'auteur déclare l'absence de tout conflit d'intérêt.

Références

[1] Rey, A. (dir.) (2010) Sérendipité. Dans *Dictionnaire historique de la langue française*, page 2087. Éditions Le Robert, Paris.

[2] Académie française (2024). Sérendipité. Dictionnaire de l'Académie française [en ligne]. https://www.dictionnaire-academie.fr/article/A9S1333. Consulté le 21/11/2026.

[3] Pasteur, L. (1939) Discours [prononcé à Douai le 7 décembre 1854 à l'occasion de l'installation solennelle de la Faculté des lettres de Douai et de la Faculté des sciences de Lille]. Dans *Mélanges scientifiques et littéraires*, édité par Pasteur Vallery-Radot, L., *Œuvres de Pasteur réunies*, t. 7, pages 135–138. Masson et Cie., Paris. Texte intégral disponible sur Wikiquote sous https://fr.wikisource.org/wiki/Discours_prononcé_à_Douai_le_7_décembre_1854_à_l'occasion_de_l'installation_solennelle_de_la_faculté_des_lettres_de_Douai_et_de_la_faculté_des_sciences_de_Lille, consulté le 21/11/2026.

[4] Van Andel, P. (1994) Anatomy of the unsought finding. Serendipity: Origin, history, domains, traditions, appearances, patterns and programmability. *The British Journal for the Philosophy of Science*, **45**(2), 631–648. https://doi.org/10.1093/bjps/45.2.631.

[5] Friedel, R. (2001) Serendipity is no accident. *The Kenyon Review*, **23**, 36–47. https://kenyonreview.org/piece/april-2001-serendipity-is-no-accident/. Consulté le 21/11/2026.

[6] Ramberg, P. J. (2000) The death of vitalism and the birth of organic chemistry: Wöhler's urea synthesis and the disciplinary identity of organic chemistry. *Ambix*, **47**(3), 170–195. https://doi.org/10.1179/amb.2000.47.3.170.

[7] Cova, T. F. G. G., Pais, A. A. C. C., et Seixas de Melo, J. S. (2017) Reconstructing the historical synthesis of mauveine from Perkin and Caro: procedure and details. *Scientific Reports*, **7**(1), 6806. https://doi.org/10.1038/s41598-017-07239-z.

[8] Ebnesajjad, S. (2013) Discovery and history of fluoropolymers. Dans *Introduction to Fluoropolymers: Materials, Technology and Applications*, PDL Handbook Series, chap. 3, pages 17–35. William Andrew Publishing, Oxford. https://doi.org/10.1016/B978-1-4557-7442-5.00003-6.

[9] Pedersen, C. J. (1988) The discovery of crown ethers (Nobel Lecture). *Angewandte Chemie International Edition*, **27**(8), 1021–1027. https://doi.org/10.1002/anie.198810211.

[10] Sivaram, S. (2017) The Ziegler catalysts: Serendipity or systematic research? *Resonance*, **22**(11), 985–1006. https://doi.org/10.1007/s12045-017-0567-x.

[11] Shirakawa, H. (2001) The discovery of polyacetylene film – the dawning of an era of conducting polymers. *Current Applied Physics*, **1**(4-5), 281–286. https://doi.org/10.1016/S1567-1739(01)00052-9.

[12] Max Delbrück Oral History Interview, interviewé par Carolyn Harding. Pasadena, Californie, 14 juillet – 11 septembre 1978. Caltech Archives Oral History Project. http://resolver.caltech.edu/CaltechOH:OH_Delbruck_M. Consulté le 21/11/2026.

[13] Hauser, N., Kraft, Ph., et Carreira, E. M. (2020) The serendipitous discovery of a rose odorant. *Chimia*, **74**(4), 247–251. https://doi.org/10.2533/chimia.2020.247.

[14] Feng, H., Gao, R., Guo, F., Wan, W., Shen, D., Yan, J., Ge, Y., Shen, K., Zhang, X., et Liu, Y. (2026) Congo Red derived covalent proteotyping sensor for amyloid deposits in Alzheimer's disease. *ACS Sensors*, **11**(1), 27–33. https://doi.org/10.1021/acssensors.5c03211.

[15] Pegu, C. D., Baruah, B., et Deb, M. L. (2025) The beauty of serendipity in organic synthesis: Unveiling unexpected pathways to novel molecules. *ChemistrySelect*, **10**(24), e01055. https://doi.org/10.1002/slct.202501055.

[16] Rosenthal, U. (2022) How serendipity and chance can be transformed into knowledge: Examples from 50 years of research in organometallic chemistry and homogeneous catalysis. *Organometallics*, **41**(23), 3478–3492. https://doi.org/10.1021/acs.organomet.2c00517.

[17] Kantorovich, A. et Ne'eman, Y. (1989) Serendipity as a source of evolutionary progress in science. *Studies in History and Philosophy of Science Part A*, **20**(4), 505–529. https://doi.org/10.1016/0039-3681(89)90021-6.

[18] Yang, L. et Gouverneur, V. (2025). Recovery of fluoride from 'forever chemicals' could lead to circular economy for fluorine. *Nature Research briefing* [en ligne]. https://doi.org/10.1038/d41586-025-00882-x.

[19] Yang, L., Chen, Z., Goult, C. A., Schlatzer, T., Paton, R. S., et Gouverneur, V. (2025) Phosphate-enabled mechanochemical PFAS destruction for fluoride reuse. *Nature*, **640**, 100–106. https://doi.org/10.1038/s41586-025-08698-5.

[20] Yang, L., Layton, C. L., Goult, C. A., Chen, Z., Paton, R. S., et Gouverneur, V. (2026) Silicate-enabled mechanochemical mineralization of polymeric and nonpolymeric PFAS into sodium fluoride. *Journal of the American Chemical Society*, **148**(17), 17 977–17 982. https://doi.org/10.1021/jacs.6c01470.

[21] Kroto, H. (1997) Symmetry, space, stars, and C_{60} (Nobel Lecture). *Angewandte Chemie International Edition*, **36**(15), 1578–1593. https://doi.org/10.1002/anie.199715781.

[22] Bianchi, P. et Monbaliu, J.-C. M. (2024) Revisiting the paradigm of reaction optimization in flow with a priori computational reaction intelligence. *Angewandte Chemie International Edition*, **63**(5), e202311526. https://doi.org/10.1002/anie.202311526.

[23] Popper, K. R. (2017) *La logique de la découverte scientifique [traduit de l'anglais par Nicole Thyssen-Rutten et Philippe Devaux, préface de Jacques Monod]*. Payot, Paris.

[24] Kuhn, T. S. (2025) *La structure des révolutions scientifiques [traduit de l'anglais par Laure Meyer]*. Champs. Flammarion, Paris.

[25] Ross, W., Copeland, S., et Firestein, S. (2024) Serendipity in scientific research. *Journal of Trial and Error*. https://doi.org/10.36850/v91j-7541.

[26] García, P. (2009) Discovery by serendipity: a new context for an old riddle. *Foundations of Chemistry*, **11**(1), 33–42. https://doi.org/10.1007/s10698-008-9061-6.

[27] Copeland, S. (2023) Serendipity and the history of the philosophy of science. Dans *Serendipity Science: An Emerging Field and its Methods*, édité par Copeland, S., Ross, W., et Sand, M., chap. 6, pages 101–123. Springer, Cham, Suisse. https://doi.org/10.1007/978-3-031-33529-7_6.

[28] Belkheiri, N. (2026) Unexpectedness in organic chemistry: towards a new material epistemology. *Foundations of Chemistry*, **28**(1), 21–36. https://doi.org/10.1007/s10698-025-09561-1.