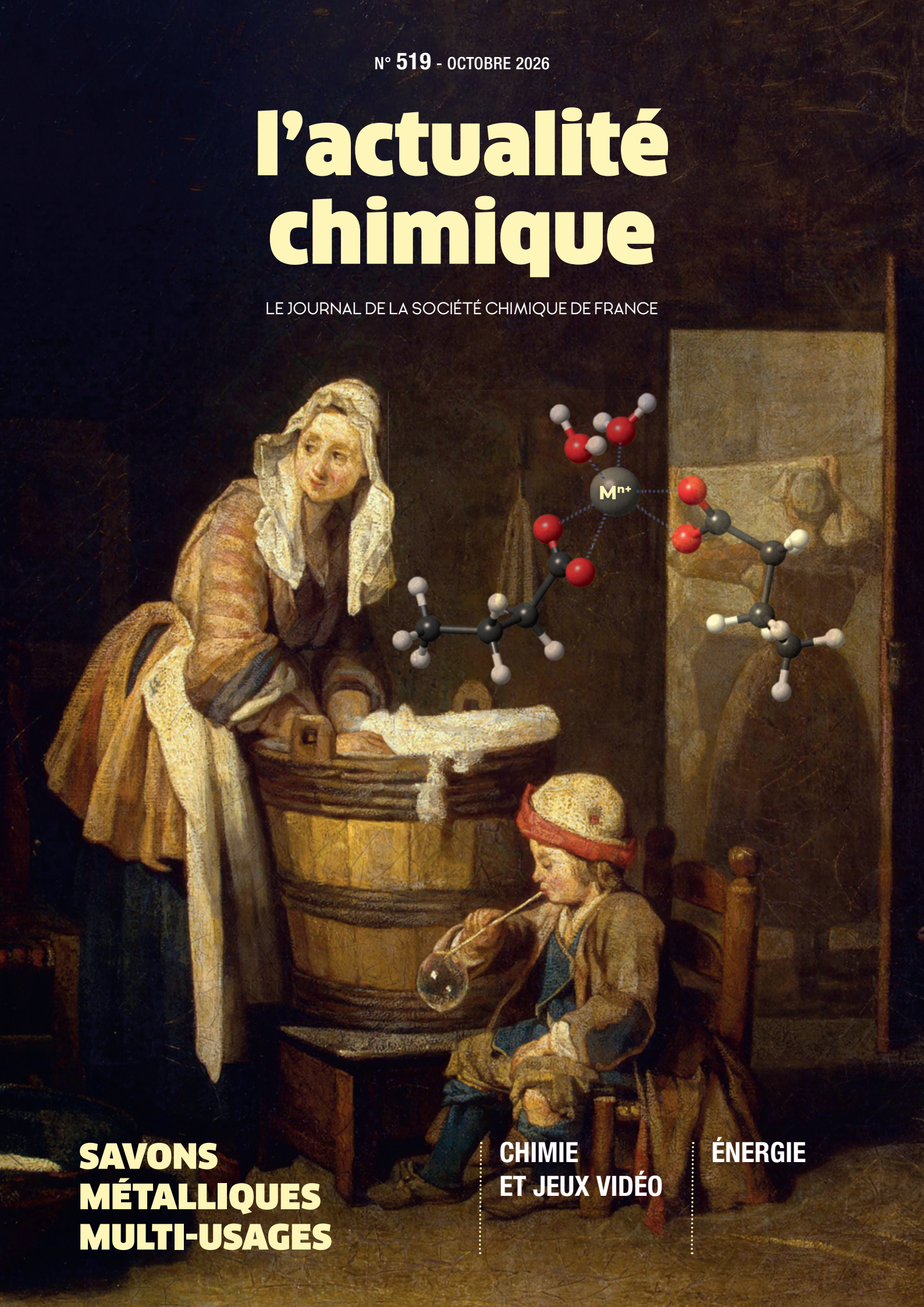
N° 519 - OCTOBRE 2026

l'actualité chimique

LE JOURNAL DE LA SOCIÉTÉ CHIMIQUE DE FRANCE



SAVONS MÉTALLIQUES MULTI-USAGES

CHIMIE ET JEUX VIDÉO

ÉNERGIE

Reaxys

ELSEVIER

Reaxys Trial:

Bénéficiez d'un accès gratuit pendant 15 jours.

Discover what Reaxys can do for you.



MATÉRIELS & CONSOMMABLES DE LABORATOIRE SOUFFLAGE DE VERRE

cloup



cloup.fr

l'actualité chimique

Édité par la Société Chimique de France
250 rue Saint-Jacques, 75005 Paris
adhesion@societechimiquedefrance.fr
www.societechimiquedefrance.fr
Directrice de la publication : Gilberte Chambaud
Partenariats : CNRS, Fondation de la Maison de la Chimie

RÉDACTION
SCF, 250 rue Saint-Jacques, 75005 Paris
redaction@lactualitechimique.org
www.lactualitechimique.org
Rédacteur en chef : Pierre Rabu
Rédactrice en chef adjointe : Séverine Bléneau-Serdel

COMITÉ DE RÉDACTION
H. Arribart, J. Barrault, X. Bataille, E. Benedetti, C. Bresson, K. Cariou, C. Cebrian-Avila, C. Clavaguera, P. Colomban, B. Delfort, L. Estournet, K. Fajerwerg, D. Fauque, J.-P. Foulon, J. Fournier, A. Gautier, J.-F. Gérard, P. Hirchenhahn, C. Houée-Levin, J. Lalande, E. Marceau, V. Marvaud, P. Moisy, X. Montagne, J.-M. Paris, A. Perrot, P. Pichat, A.-V. Ruzette, S. Tencé, H. This, H. Toulhoat, P. Walter, S. Yembou

Publication analysée ou indexée par :
Chemical Abstracts, base de données PASCAL
Crossref : http://doi.org/10.63133/scf.act-chim
DOI : 10.63133/scf.act-chim

ABONNEMENT
SCF, Martine Maman
250 rue Saint-Jacques, 75005 Paris
adhesion@societechimiquedefrance.fr

COMMUNICATION
SCF, Olivia Pradel
communication@societechimiquedefrance.fr

FABRICATION
MAQUETTE : Redouane Sahih, sahih.redouane@gmail.com
IMPRESSION, ROUTAGE : N. Fortin & ses fils imprimeurs
94800 Villejuif, fortimprimerie@wanadoo.fr

PUBLICITÉ
Tarifs et informations :
https://new.societechimiquedefrance.fr/lactualite-chimique-le-journal-de-la-scf/publicite
secretariat@societechimiquedefrance.fr

ISSN version papier 0151 9093
ISSN version électronique 2105 2409

© SCF 2026 – Tous droits de reproduction réservés
Dépôt légal : octobre 2026
Toute représentation ou reproduction, intégrale ou partielle, fait sans le consentement de l'auteur, ou des ayants droits, ou ayant cause, est illicite (loi du 11 mars 1957, alinéa 1er de l'article 40). Cette représentation ou reproduction, par quelque procédé que ce soit, constituerait une contrefaçon sanctionnée par les articles 425 et suivants du Code pénal. La loi du 11 mars 1957 n'autorise, aux termes des alinéas 2 et 3 de l'article 41, que les copies et les reproductions strictement réservées à l'usage privé du copiste et non destinées à une utilisation collective d'une part, et, d'autre part, que les analyses et les courtes citations dans le but d'exemple ou d'illustration.



Allons de l'avant

En ces temps de discussion budgétaire et de pré-campagne présidentielle, la question de la place de le recherche scientifique en France est le sujet de beaucoup d'articles et communiqués de presse. Ces articles font écho aux actions de nombreux acteurs, les sociétés savantes telles que la SCF, l'Académie des sciences, les organismes et opérateurs de recherche… qui alertent sur une situation qui peut devenir critique pour la recherche et, par ricochet, pour l'innovation et l'éducation. Le sujet est abordé dans notre rubrique « À propos de » qui éclaire sur l'évolution de la production scientifique dans différentes disciplines à l'échelle internationale. La chimie n'échappe évidemment pas au mouvement général, mais le climat morose ne nous empêche pas de continuer à mener des projets scientifiques innovants et fructueux, démontrant l'intérêt de la chimie comme source d'innovation et de progrès.

Des savons à l'optoélectronique

À la une de ce numéro, nous avons choisi le savon, plus précisément les savons métalliques. Vous pourrez découvrir certaines facettes pas si connues de ces molécules *a priori* simples qui trouvent des applications très variées, de la lessive aux revêtements de cellules photovoltaïques. Les cellules photovoltaïques, justement, nous les connaissons à base de silicium, de colorants photosensibles ou encore de pérovskites lamellaires hybrides. C'est l'ADN qui vous est présenté ici dans un article traitant de ses propriétés d'absorption de la lumière et de ses perspectives d'application dans les dispositifs optoélectroniques.

Chimie organique, lumière et catalyse

La lumière, il en est encore question dans l'article de Clément Ghiazza, Prix Émergence Marc Julia 2025 de la division Chimie Organique, qui illustre, à travers l'exemple de la photochimie, comment les chimistes organiciens explorent des procédés efficaces et robustes pour la chimie des hétérocycles, notamment présents au sein des molécules bioactives. Efficacité des synthèses et nouveaux procédés, c'est bien ce à quoi travaillent nombre de chimistes. Ainsi, vous pourrez lire pourquoi marier flux continu et catalyse hétérogène s'avère être une combinaison gagnante en chimie organique et comment la catalyse hétérobimétallique peut être avantageusement exploitée pour favoriser l'échange hydrogène/deutérium, essentiel pour le marquage isotopique utile en pharmacie, agrochimie, analyse chimique ou pour l'élaboration de traceurs.

Énergie

Photo-génération de charges, procédés durables, économie d'atomes… nous amènent à la problématique de l'énergie qui est si présente dans les préoccupations actuelles et pour l'avenir. Concernant le stockage de l'énergie, un bel article fait le point sur les recherches actuelles pour la mise au point de batteries sans lithium, à ions magnésium ou calcium. Y sont détaillés les espoirs mis dans cette approche et les défis qui restent à relever pour pérenniser cette nouvelle technologie. Le point de vue du producteur de source d'énergie est aussi exprimé dans notre rubrique « Industrie », présentant l'évolution stratégique d'une compagnie bien connue et très présente dans l'actualité. En écho, la rubrique « Regards sur la chimie verte » est consacrée aux rencontres nationales des projets « Compétences et Métiers d'Avenir » (Paris, 17-18 septembre 2026). Où l'on comprend que l'industrie comme la recherche sont en ordre de marche pour préparer une « mutation » énergétique, là où la décision politique reste à la traine.

En complément, vous pourrez apprendre l'origine du mot « vaccin », suivre l'actualité pharmaceutique, réviser les réactions de cycloadditions sélectives, découvrir les coulisses du partenariat de la SCF avec la Société Canadienne de Chimie et apprendre comment s'adonner à deux passions sans culpabiliser, la chimie et les jeux vidéo.
Bonne lecture !

Pierre Rabu,
Rédacteur en chef

sommaire

N° 519 - OCTOBRE 2026

ÉDITORIAL 1

Allons de l'avant, par **P. Rabu** 1

CLIN D'ŒIL ÉTYMOLOGIQUE 3

À propos de vaccins, par **P. Avenas** 3

LE GRAIN DE SEL DU RJ-SCF 4

Les jeux vidéo comme catalyseurs de la diffusion scientifique, par **L. Estournet** et **A. Perrot** 4

CHIMIE VERTE INSIGHTS – REGARDS SUR LA CHIMIE VERTE 6

De la transition à la mutation : quelle chimie pour demain ?, par **G. Chatel** 6

À PROPOS DE 9

La Société Canadienne de Chimie et la Société Chimique de France : une collaboration pour la science et la langue, par **F. Louis**, **J. Claverie** et **P. Hirchenhahn** 9

Publications : l'envol de la Chine, par **P. Colomban** 11

RECHERCHE ET DÉVELOPPEMENT 15

Transformation photochimique de pyridines et 1,2-diazépines, par **C. Ghiazza, *prix DCO 2025*** 15

Lessive, peinture à l'huile, vitrimères : le feuilleton des savons métalliques, par **I. Retailleau**, **D. Ciardi**, **J.-B. Charpentier** et **F. Tournilhac** 19

Batteries au magnésium ou au calcium : concept, évolution et état de l'art, par **A. Ponrouch** et **M. R. Palacin** 27

Flux continu, catalyse hétérogène et économie d'atomes : une combinaison idéale en synthèse organique à l'ère de la durabilité, par **B. Weyl**, **L. Le Guédard** et **B. Laroche** 33

Échange isotopique hydrogène/deutérium : quand la catalyse hétérobimétallique redéfinit le marquage isotopique, par **C. Camp** 40

Absorption UV par l'ADN : des processus fondamentaux aux applications optoélectroniques, par **D. Markovitsi** 44

Principes et substances actifs

Nouveaux principes actifs pharmaceutiques et actualités phytopharmaceutiques, par **J.-M. Paris** et **J. Fournier** 49

INDUSTRIE 52

Comment TotalEnergies se transforme en Compagnie multi-énergies, par **S. Panas** 52

AGENDA 56

ACTUALITÉS DE LA SCF 57

UN POINT SUR 63

Fiche n° 138 : Cycloadditions énantiosélectives impliquant des 2-pyrones : un outil de choix pour la synthèse de molécules complexes, par **C. Bouchel** et **A. de la Torre (*prix DCO 2025*)** 63



Couverture :
Visuel imaginé par Ianis Retailleau pour illustrer l'article sur les savons métalliques (voir p. 19), à partir du tableau *La Blanchisseuse* de Jean Siméon Chardin (1699-1779). Le modèle moléculaire a été généré par Francois Genès Tournilhac sur la base des coordonnées cristallographiques de l'acétate de zinc [1] à l'aide du logiciel VESTA [2].
[1] T. Ishioka, A. Murata, Y. Kitagawa, K.T. Nakamura, *Acta Cryst. C*, **1997**, *53*, p. 1029-31, https://doi.org/10.1107/S0108270197004484
[2] K. Momma, F. Izumi, *J. Appl. Crystallogr.*, **2011**, *44*, p. 1272-76, https://doi.org/10.1107/S0021889811038970

À propos de vaccins



Edward Jenner (1749-1823), père de l'épidémiologie. Wellcome Collection, CC-BY-4.0.

Les vaccins peuvent être considérés comme des substances chimiques au sens large, et l'étymologie du mot *vaccin* est intéressante car elle est particulièrement chargée d'histoire.

La mithridatisation, l'inoculation et l'homéopathie

Depuis la nuit des temps, et sans doute dans toutes les civilisations, les humains ont cherché à se prémunir des empoisonnements ou des maladies. L'idée est venue rapidement de s'exposer à de petites doses des agents néfastes afin d'acquérir une immunité. La légende de Mithridate VI le Grand, roi du Pont et du Bosphore entre le II^{e} et le I^{er} siècle avant J.-C., en est la parfaite illustration : redoutant d'être empoisonné par ses ennemis, il a eu l'idée de s'insensibiliser à un poison (qui n'est pas précisé) en absorbant des doses d'abord très faibles, puis de plus en plus importantes, jusqu'à s'immuniser complètement. Le comble est que, dans les circonstances dramatiques qui l'ont conduit au suicide, il n'arrivait pas à s'empoisonner et dut se faire exécuter par l'épée. Du nom de Mithridate viennent le terme de *mithridatisation* et le verbe *mithridatiser*.

Depuis très longtemps également, avec la même idée, on a cherché à immuniser une personne saine contre une maladie en lui injectant un peu de fluide extrait d'une personne malade. Cela se nommait l'*inoculation*, terme venant du latin *inoculatio*, qui désignait le greffage des plantes, du latin *oculus*, « œil », l'œil étant ici l'incision faite sur le tronc ou la tige d'une plante pour y introduire le greffon. Le mot *inoculation* pouvait encore s'appliquer en français au greffage végétal en 1580. Par analogie, ce mot s'est employé en médecine humaine pour désigner l'injection d'une substance dans le sang : le mot est attesté en 1723 en français, et un peu plus tôt en Angleterre où cette pratique était plus développée.

L'inoculation était controversée car demeurait toujours le risque de donner la maladie au lieu d'en protéger. Cependant, il a été prouvé que le bénéfice l'emportait sur le risque, notamment dans le cas de la variole. La pratique de l'inoculation de cette maladie, dite *variolisation*, s'est donc largement répandue. Ainsi, le roi Louis XV venant de mourir de la variole le 10 mai 1774, son petit-fils, devenu alors Louis XVI à l'âge de dix-neuf ans, a été variolisé dès le mois suivant, avec succès.

Il est pertinent d'évoquer ici le concept d'homéopathie, établi en 1796 par le médecin allemand Samuel Hahnemann, à partir de la même idée : soigner le mal par le mal. Cependant, Hahnemann est arrivé à l'idée de l'extrême dilution des principes actifs, jusqu'à l'absurde : des comprimés dans lesquels il n'est pas sûr de trouver même une seule molécule active. Il est étonnant que l'homéopathie se pratique aujourd'hui alors qu'aucune preuve scientifique de son efficacité n'ait été apportée.

Le génie de Jenner et la vaccination

Edward Jenner (1749-1823) était un médecin de campagne anglais qui a tenu l'un des premiers raisonnements épidémiologiques de l'histoire. Il a remarqué que les vachers et vachères, responsables de la traite des vaches, n'attrapaient pratiquement jamais la variole. Or il connaissait aussi les maladies des bovins se manifestant par des pustules : le *cowpox*, de *pox*, « poche », ici « pustule », ou la maladie voisine nommée en français comme en anglais *vaccine*, du latin médical *variola vaccina*, « variole de la vache », du latin *vacca*, « vache ». Comprenant que le contact avec les pustules apportait une immunisation contre la variole humaine, Jenner a osé dès 1796 injecter dans le bras de ses patients du contenu de ces pustules.

Il se trouve que les virus de ces maladies bovines sont des formes atténuées du virus de la variole humaine, et donc le succès a été complet. Les campagnes de ce qui s'est nommé *vaccination* se sont généralisées et la variole humaine a été déclarée éradiquée en 1980 par l'OMS.

Le mot *vaccin*, qui vient donc du nom latin de la vache, a d'abord désigné, encore en 1801, une substance organique propre à créer une réaction immunitaire contre la variole, puis son sens attesté en 1852 est devenu générique : substance organique propre à créer une réaction immunitaire préventive ou curative contre une maladie infectieuse.

Claude Bernard écrivait en 1878, dans ses *Principes de médecine expérimentale* : « *L'organisme se mithridatise, c'est-à-dire s'habitue non seulement aux agents physiques, comme la sensibilité de la peau s'émousse, mais il se mithridatise contre des agents morbides. Ainsi le vaccin qui empêche la variole pendant un temps si grand ! La syphilisation, la vaccination de la péripneumonie contagieuse ! Comment agissent toutes ces vaccinations ? Quelle modification est imposée à l'organisme ? Recherches très intéressantes à ce sujet.* » On constate que Claude Bernard n'hésitait pas à assimiler vaccination et mithridatisation.

Épilogue

Le mot *vaccin*, de par son étymologie, rend hommage à l'une des innovations les plus remarquables de l'histoire de l'humanité. À ce propos, le verbe *vacciner* a pris aussi le sens figuré : mettre à l'abri d'un mal, quel qu'il soit. Il faudra penser aussi aux vaccins contre les maladies virales générées par l'IA !



La vaccination gratuite contre la variole dans le grand hall du *Petit Journal*, Paris, 1905.

Pierre AVENAS*,
ex directeur de la R & D dans l'industrie chimique.

*pier.avenas@orange.fr

Les jeux vidéo comme catalyseurs de la diffusion scientifique



Il paraît que quand le mensonge prend l'ascenseur, la vérité prend l'escalier. Alors quand le mensonge semble prendre un ascenseur propulsé au propergol de fusées réutilisables, toute aide permettant de faire monter la vérité plus vite est bonne à prendre. Les jeux vidéo ont alors aussi leur carte à jouer grâce à leur place de choix dans le paysage culturel.

Les jeux vidéo ont longtemps été associés à la banalisation de la violence, un raccourci souvent repris dans le débat public pour simplifier à l'extrême des problématiques pourtant complexes [1]. Des recherches récentes démontrent cependant leurs bénéfices et indiquent que leur impact sur l'agressivité à long terme reste à nuancer en tenant compte notamment de facteurs socioéconomiques [2]. De plus en plus de jeux « violents » cherchent d'ailleurs à proposer aux joueurs des dilemmes éthiques et moraux pour interroger la violence qu'ils mettent en scène [3]. Cette vision étriquée laisse de côté la diversité de jeux vidéo « non violents », notamment éducatifs, alors que leur effet bénéfique sur certaines compétences cognitives, comme la résolution de problèmes, la mémoire, la prise de décision et la créativité, fait l'objet d'un ensemble grandissant d'études [4]. Quoi qu'il en soit, qu'ils servent d'exutoire ou de divertissement, il est indéniable que les jeux vidéo ne cessent de gagner en popularité.

La démocratisation du jeu vidéo en France en fait un outil idéal pour promouvoir la culture scientifique, en particulier la chimie, auprès du grand public. En 2025, sept Français·es sur dix jouaient à des jeux vidéo au moins une fois par an, parmi lesquels 76 % jouaient même au moins une fois par semaine [5]. Spécifiquement, 92 % des enfants et adolescents de 10 à 17 ans jouent à des jeux vidéo, mais également 88 % des adultes de 18 à 80 ans, témoignant de leur popularité auprès de toutes les générations. La chimie est une science expérimentale qui peut être difficile à « vulgariser », mais elle peut (et doit) alors profiter de cette audience et des avantages que propose le jeu vidéo par rapport à des moyens plus conventionnels de médiation scientifique, notamment l'interactivité avec le public, même si cela passe par la simplification de ses concepts théoriques pour gagner en accessibilité.

Nous vous proposons donc ici une sélection non exhaustive de jeux vidéo s'approchant des concepts de la chimie pouvant intéresser les « gamers », les personnes curieuses, voire mêmes les enseignant·es souhaitant proposer des outils de révision différents à leurs étudiant·es. Les plus intéressé·es pourront trouver davantage de ressources en ligne et peuvent également nous contacter pour connaître nos résultats de recherche complets.

Ceux où la construction de « molécules » brique par brique est au cœur du gameplay

Richard Feynman rêvait de machines nanoscopiques pouvant construire des molécules atome par atome [6] ; Zachtronics Industries s'en est approché avec les jeux de réflexion présentés dans cette première partie : *The Codex of Alchemical Engineering* (2008), *Opus Magnum* (2017), *SpaceChem* (2011) et *MOLEK-SYNTEZ* (2019). Ils reposent sur la même mécanique centrale : utiliser une suite de règles simples (attraper, déplacer, accrocher, tourner…) pour manier des blocs élémentaires et assembler des édifices complexes. Les deux premiers adoptent plutôt la thématique de l'alchimie, où les produits n'ont pas ou peu de sens chimique moderne, mais *MOLEK-SYNTEZ* utilise des dénominations d'atomes pour former des molécules organiques existantes, comme l'aspirine ou le cyclohexane. *SpaceChem* utilise également cette mécanique de « puzzle » pour la construction de molécules, mais ajoute également une dimension de gestion de machines, le rapprochant des jeux de notre catégorie suivante.

Ceux où la gestion est l'intérêt principal, mais où l'industrie chimique est aussi présente

Si vous préférez plutôt vous torturer l'esprit en optimisant la production d'usines ou la gestion de colonies, les jeux de cette partie ont le gameplay qu'il vous faut. Leur mécanique principale est fondée sur l'optimisation spatiale et temporelle de différentes ressources (matérielles, énergétiques ou même humaines) pour atteindre différents objectifs. La mécanique de transformation de ressources y est parfois étonnamment similaire à la vie réelle. Par exemple, dans *Satisfactory* (2024, Coffee Stain Studios), il est possible de raffiner de la bauxite avec de l'eau pour former une solution d'alumine, ensuite elle-même combinée à de l'acide sulfurique pour faire des batteries ou alors réduite avec du charbon pour former de l'aluminium. Dans *Captain of Industry* (2022, MaFi Games), l'usine chimique permet de transformer de l'hydrogène et de l'azote en ammoniac. *Oxygen Not Included* (2019, Klei Entertainment) va encore plus loin en attribuant à la plupart des matériaux une température de fusion, d'ébullition, une dureté, une densité, une capacité thermique ou une masse molaire.

Ceux à vocation éducative

Votre objectif est peut-être plutôt de (faire) découvrir la chimie avec des jeux dont c'est la thématique centrale. *HoloLAB Champions* (2018, Schell Games) est un jeu de réalité virtuelle où le joueur manipule des béchers, des éprouvettes, réalise des mélanges ou effectue des pesées pour réaliser des objectifs, permettant de vivre une expérience immersive (quoique romancée) du travail de paillasse. Le jeu *Minecraft* développé par Mojang Studios a sorti une version adaptée à l'enseignement, nommée *Minecraft Education*, dont un des mods est consacré à la chimie et permet, entre autres, de former des éléments à partir de protons, de neutrons et d'électrons, ou même de préparer de la Javel à partir d'eau et d'hypochlorite de sodium.

Ceux pour les experts en chimie ou pour les révisions

Pour les chimistes plus assidus, *Chemidle* (2022, Chen Yuheng) propose de retrouver une réaction chimique à la façon d'un *Wordle* (ou d'un *Motus*, suivant les références de chacun·e) et, de manière similaire mais pour les experts en chimie organique, *Chemdle* (2024, Sam Ellis) vous laisse six chances pour dessiner le produit exact d'une réaction chimique chaque jour. Ces jeux sont idéals pour les personnes voulant tester leurs connaissances générales en chimie de synthèse et qui cherchent un vrai défi !

Ceux où jouer permet de faire avancer la recherche

C'est le pari de certains jeux participatifs, qui transforment des problèmes scientifiques complexes en énigmes accessibles au grand public. *Foldit* (2008, université de Washington) propose par exemple aux joueurs de manipuler des structures de protéines afin d'identifier des configurations stables par la suite exploitées par les chercheurs et *EteRNA* (2010, universités de Carnegie Mellon et Stanford) reprend un principe similaire pour la conception de molécules d'ARN : les joueurs élaborent des séquences qui sont ensuite synthétisées et testées expérimentalement en laboratoire. Via ces jeux, les joueurs peuvent produire des données, des hypothèses et même de nouvelles stratégies utiles aux chercheurs. L'engouement autour de *Foldit* et *EteRNA* a fait émerger de nouvelles approches, tant pour résoudre des problèmes de repliement et de structure des protéines [7] que pour améliorer les modèles et les stratégies de conception de séquences d'ARN [8].

Quel que soit votre profil de joueur, il y a probablement un jeu vidéo fait pour vous dans cette liste. Si ce n'est pas le cas, vous pouvez toujours envisager de le créer vous-même ; des *Scientific Game Jam* sont organisées tous les ans dans plusieurs villes françaises et à l'étranger, permettant aux scientifiques et aux créateurs de jeux vidéo de collaborer pour créer de nouvelles œuvres vidéoludiques autour d'un thème dans le domaine de la médecine, de l'histoire, de la physique… Les archives des jeux sont d'ailleurs accessibles sur leur site web [9].

[1] B. Donnadieu, Emmanuel Macron : « Cinq à six heures par jour à tuer des gens »… Le Chef de l'État va-t-il s'attaquer aux jeux vidéo « violents » ?, *La Dépêche du Midi*, 09/02/**2026**.
[2] D. Courbet, L.-E. Bernard, Les jeux vidéo rendent-ils violents au point de tuer ?, *The Conversation*, 18/02/**2025**.
[3] E. Petit, Le paradoxe des jeux vidéo : entre glorification de la violence et émergence d'une conscience morale, *The Conversation*, 26/04/**2026**.
[4] J. M. Nagata *et al.*, Health benefits of video games in adolescents and young adults, *Curr. Pediatr. Rep.*, **2026**, *14*, 2, https://doi.org/10.1007/s40124-026-00376-y
[5] SELL (Syndicat des Éditeurs des Logiciels de Loisirs), Bilan du marché français 2025, *L'essentiel du jeu vidéo*, avril **2026**, www.sell.fr/news/le-bilan-marche-2025
[6] R. Feynman, There's plenty of room at the bottom, *Eng. Sci.*, **1960**, *23*, p. 22-36.
[7] S. Cooper *et al.*, Predicting protein structures with a multiplayer online game, Nature, **2010**, *466*, p. 756-60, https://doi.org/10.1038/nature09304
[8] J. Lee *et al.*, RNA design rules from a massive open laboratory, *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, **2014**, *111*, p. 2122-27, https://doi.org/10.1073/pnas.1313039111
[9] https://scientificgamejam.org/jeux

Zoom sur le RJ-Lorraine

Pour rassembler une communauté toujours plus large autour de la chimie, le réseau jeune Lorraine a réouvert ses portes en avril 2026 ! Depuis, il a déjà participé aux Journées d'électrochimie 2026 (Nancy), aux journées de rentrée de la Faculté de Sciences et Technologies (Nancy) pour se présenter aux étudiants, à la Journée de la Recherche (Metz) et à la journée dédiée à l'Institut Jean Lamour. Et il souhaite ne pas s'arrêter là ! Afin de fédérer les jeunes chimistes et favoriser les échanges, différentes actions vont être menées, comme l'organisation d'un « chemi-quiz » dans un cadre détendu, des webinaires pour faire découvrir la diversité des métiers de la chimie, ou encore l'attribution de prix de stage pour valoriser les travaux des jeunes chercheurs.
Actuellement basé à Nancy, le RJ-Lorraine souhaite s'étendre et accueillir de nouveaux membres pour rejoindre son bureau et contribuer à de nouveaux projets*.
*Contact : bureau-rj-lorraine@societechimiquedefrance.org et www.linkedin.com/company/rj-scf-lorraine



De gauche à droite : Léa Tissier (présidente), Claire Hugon (secrétaire), Mélodie Becker (trésorière) et Laura Roche (vice-présidente absente de la photo).

Appel à contributions

La rubrique Grain de Sel du RJ-SCF est ouverte aux contributions de jeunes chimistes souhaitant partager leurs travaux de recherche, leurs initiatives ou leurs réflexions autour de la chimie. Articles de vulgarisation, mises en perspective de projets scientifiques, liens entre chimie et société ou retours d'expérience sont particulièrement bienvenus.
Étudiant·es, doctorant·es, postdoctorant·es et jeunes professionnels désireux de contribuer en tant qu'auteurs sont invités à prendre contact directement avec l'équipe de rédaction. Les auteurs peuvent être joints *via* leurs adresses électroniques.

Les « Grains de Sel » sont coordonnés par **Lise ESTOURNET**, membre du Bureau national du RJ-SCF, responsable communication (lise.estournet@gmail.com), et **Alexis PERROT**, président du RJ-SCF Normandie (alexis.perrot@ensicaen.fr). Ils sont en téléchargement libre sur www.lactualitechimique.org

De la transition à la mutation : quelle chimie pour demain ?

Grégory CHATEL

Directeur de la Chimie Verte Academy, maitre de conférences HDR à l'Université Savoie Mont Blanc.
✉ gregory.chatel@univ-smb.fr

Les 17 et 18 septembre derniers, plus de 340 acteurs engagés dans les projets « Compétences et Métiers d'Avenir » (CMA) se sont réunis à l'Université Sorbonne Nouvelle, à Paris, pour leur rencontre nationale. Au-delà du bilan d'un dispositif désormais largement déployé, ces journées ont permis d'interroger la manière dont les investissements de France 2030 peuvent accompagner des transformations qui dépassent la seule création de nouvelles formations. En invitant les lauréats à penser désormais en termes de « mutation », de pérennisation et de prospective, Bruno Bonnell, secrétaire général pour l'investissement, a ouvert plusieurs pistes de réflexion qui trouvent un écho particulier dans les évolutions actuelles de la chimie.



Intervention de Bruno Bonnell lors de la rencontre nationale des lauréats CMA, 17 septembre 2026, Université Sorbonne Nouvelle (photo : G. Chatel).

Cette rencontre nationale des lauréats « Compétences et Métiers d'Avenir » a réuni 342 participants, dont 275 représentants des projets lauréats, autour des équipes du Secrétariat général pour l'investissement (SGPI), des ministères, de l'Agence nationale de la recherche (ANR) et de la Banque des Territoires. Lancé en décembre 2021, le dispositif CMA compte désormais 234 projets, soutenus à hauteur d'environ 1,3 milliard d'euros, et le SGPI indique que 353 000 personnes ont déjà été formées, avec pour ambition d'atteindre 400 000 personnes formées par an à l'horizon 2030.

Ces résultats donnent la mesure prise par le programme sans pour autant résumer son impact. Lors de son intervention, Bruno Bonnell a lui-même insisté sur une fragilité : le taux moyen de remplissage des projets CMA reste de l'ordre de 75 %, avec des situations très différentes d'une formation à l'autre. Il en fait même l'un des principaux points de vigilance du programme. Développer de nouvelles formations ne suffit donc pas, encore faut-il qu'elles rencontrent leur public, qu'elles répondent à des besoins clairement identifiés et qu'elles permettent aux futurs étudiants de comprendre à quelles transformations ils pourront contribuer.

Cette question trouve un écho particulier en chimie. Les besoins industriels évoluent rapidement, tandis que les enjeux associés à l'énergie, aux ressources, à l'environnement, à la réindustrialisation ou à la souveraineté deviennent de plus en plus structurants. Dans le même temps, l'attractivité de la discipline demeure un enjeu récurrent. Former aux métiers d'avenir suppose donc non seulement de transmettre de nouvelles compétences, mais aussi de rendre plus visible la place que la chimie peut occuper dans les transformations industrielles et environnementales des prochaines décennies. C'est dans ce contexte qu'une formule employée par Bruno Bonnell mérite une attention particulière : « *Il faut oublier le mot transition* […] *le vrai mot, c'est mutation.* »

De la transition à la mutation

Depuis plusieurs années, les notions de transition énergétique, écologique ou industrielle se sont imposées dans les politiques publiques comme dans les stratégies des entreprises. Parler de mutation va cependant plus loin : il ne s'agit plus seulement de faire évoluer progressivement un système existant, mais de prendre en compte des transformations simultanées liées à l'énergie, aux ressources, au climat, aux tensions géopolitiques ou encore au numérique, qui modifient en profondeur les procédés, les chaînes d'approvisionnement et les modèles industriels.

La chimie est directement concernée par ces évolutions, parce qu'elle transforme la matière, mobilise de l'énergie et fournit des molécules et des matériaux essentiels à de très nombreux secteurs. L'enjeu ne consiste donc plus seulement à réduire les consommations, les émissions ou les déchets des procédés existants, mais aussi à réinterroger les ressources utilisées, les voies de transformation, les produits fabriqués, leurs usages et leur devenir.

Cette évolution renforce la pertinence d'une approche systémique de la chimie verte. Les principes qui ont accompagné son développement restent des repères fondamentaux, mais ils conduisent aujourd'hui à considérer conjointement matières premières, efficacité des transformations, énergie, eau, toxicité, impacts environnementaux et fin de vie. Une solution ne peut plus être appréciée uniquement à l'échelle d'une réaction ou d'un rendement. Elle doit être replacée dans l'ensemble du système auquel elle appartient.

Cette dimension apparaît également dans plusieurs projets CMA, où la chimie n'est pas toujours explicitement affichée dans les intitulés mais reste présente à travers la décarbonation, les bioressources, les biotechnologies industrielles, les matériaux, le recyclage, l'hydrogène ou encore la valorisation du CO_2. Cette diversité rappelle que la transformation à venir

ne reposera vraisemblablement ni sur une ressource unique ni sur une technologie dominante, mais sur la combinaison de solutions adaptées aux différents procédés, produits et usages (voir *encadré*).

Des CMA complémentaires autour des transformations de la chimie

Plusieurs projets lauréats « Compétences et Métiers d'Avenir » illustrent cette diversité d'approches et montrent comment différentes dimensions de la transformation de la chimie se traduisent déjà en besoins de compétences :

• La ***Chimie Verte Academy*** porte une approche transversale de la chimie verte, depuis l'attractivité et la formation initiale jusqu'à la formation continue et l'accompagnement des entreprises. Elle associe notamment ressources renouvelables ou recyclées, économie circulaire, éco-procédés et évaluation environnementale, dans une logique nationale réunissant plusieurs universités et partenaires socioéconomiques.
• ***DecarboChim*** se concentre sur les compétences nécessaires à la décarbonation des industries de la chimie, du génie chimique et du génie des procédés, avec la construction de référentiels et de formations partagés à l'échelle nationale.
• ***BIORAF*** aborde la transformation de la biomasse végétale dans une logique de bioraffinerie intégrée, en associant procédés chimiques et biotechnologiques et en considérant l'ensemble de la chaîne, de la bioressource jusqu'aux produits et à leur évaluation environnementale.
• ***FIBI - Formations Innovantes en Biotechnologies Industrielles*** développe les compétences nécessaires aux produits biosourcés et aux biotechnologies industrielles, avec l'objectif d'accompagner le développement de la bioéconomie et les besoins de compétences associés.
• ***CAP3R - Compétences Avenir Plasturgie*** travaille sur les compétences nécessaires dans les domaines des polymères, composites et textiles, en particulier celles liées à la recyclabilité, au recyclage et à l'utilisation de matières recyclées, en formation initiale comme en formation continue.
• ***MERCASTO - MEsurer, Réduire, CApter, STOcker*** les émissions industrielles de CO_2 associe mesure des impacts, analyse de cycle de vie, matériaux pour l'énergie, recyclage, capture, stockage et valorisation du CO_2, avec des formations initiales, continues et doctorales.

Pris ensemble, ces projets abordent des briques différentes mais complémentaires. Décarboner l'énergie, défossiliser les matières premières, développer les biotechnologies, valoriser la biomasse, recycler davantage les matériaux ou utiliser le CO_2 comme ressource potentielle ne constituent pas des trajectoires concurrentes, mais différentes dimensions d'une même transformation du système chimique et industriel.

De l'investissement à la transformation durable

Les échanges de ces journées montrent également que France 2030 entre progressivement dans une nouvelle phase. Après le lancement des projets, l'enjeu porte désormais davantage sur leur impact et sur leur capacité à perdurer au-delà des financements initiaux. Bruno Bonnell l'a formulé très directement : « *La première mission, c'est la pérennisation*. » Cette pérennisation ne repose pas uniquement sur la recherche de nouveaux financements. Elle suppose aussi que les actions développées puissent progressivement s'intégrer dans les stratégies des établissements, leurs projets pédagogiques et leurs cartes de formation. L'objectif est ainsi de passer d'initiatives financées pour quelques années à des transformations capables de faire évoluer durablement les compétences, les pratiques et les interactions entre formation, recherche et entreprises.

Une électricité bas-carbone au service de la transformation de la chimie

Parmi les perspectives évoquées, Bruno Bonnell a qualifié de futur « or blanc » l'électricité bas-carbone dont la France pourrait disposer dans les prochaines décennies, en posant la question de sa transformation en valeur industrielle. Pour la chimie, cette disponibilité peut constituer un levier important : électrochimie et électrosynthèse, production d'hydrogène bas-carbone, électrification de certains procédés, valorisation du CO_2 ou recyclage sont autant de voies susceptibles d'en bénéficier.
Cet avantage énergétique ne suffit cependant pas, à lui seul, à répondre à l'ensemble des enjeux environnementaux associés à la chimie. L'origine des matières premières, la consommation de ressources et d'eau, la toxicité ou encore la fin de vie des produits restent déterminantes. Pour l'industrie chimique, il faut donc distinguer la décarbonation de l'énergie de la défossilisation de la matière : une partie du carbone fossile n'est pas brûlée, mais incorporée aux molécules produites. Réduire cette dépendance suppose alors de combiner, selon les applications, ressources renouvelables, matières recyclées, coproduits ou CO_2 avec de nouvelles voies de transformation rendues notamment possibles par une énergie bas-carbone.

Lorsque les contraintes accélèrent l'innovation

En évoquant les tensions actuelles sur l'énergie et le prix des carburants, Bruno Bonnell a rappelé que certaines crises peuvent accélérer l'évolution des choix technologiques. Pour la chimie, cette question est particulièrement importante : la pétrochimie s'est développée à partir de ressources fossiles abondantes et de chaînes industrielles optimisées depuis plusieurs décennies, ce qui explique aussi la profondeur de la dépendance actuelle.
Une hausse durable du prix du pétrole, des tensions d'approvisionnement ou des contraintes environnementales ne constituent évidemment pas des situations souhaitables en elles-mêmes, mais elles peuvent modifier rapidement les conditions économiques et stratégiques dans lesquelles les technologies sont comparées. Des voies longtemps pénalisées par leur coût ou leur maturité peuvent alors devenir plus pertinentes : recours à des matières premières recyclées ou biosourcées, procédés catalytiques, biotechnologiques ou électrochimiques, ou encore nouvelles voies de valorisation du CO_2.
La transformation ne reposera probablement pas sur le remplacement du pétrole par une ressource unique, mais sur la combinaison de solutions adaptées aux molécules, aux procédés et aux usages. Dans ce contexte, la chimie verte ne consiste pas seulement à réduire les impacts du système existant : les contraintes sur l'énergie, les ressources ou les émissions peuvent aussi devenir des moteurs d'innovation, à condition que la recherche ait suffisamment anticipé pour disposer de solutions lorsque leur déploiement devient nécessaire.

Anticiper les évolutions et faire évoluer les compétences

La rapidité des transformations explique un autre message fort de ces journées : la nécessité de renforcer la veille et la prospective. Bruno Bonnell a invité les projets à continuer

d'ajuster leurs formations et à identifier leurs « trous dans la raquette », c'est-à-dire les évolutions insuffisamment anticipées lors de la conception initiale des projets. L'intelligence artificielle en constitue un exemple particulièrement visible en chimie, mais d'autres transformations liées aux ressources, à l'eau, au recyclage, aux biotechnologies, à l'électrification des procédés ou aux évolutions réglementaires peuvent être tout aussi structurantes.

Les fondamentaux de la chimie resteront indispensables, mais les outils, les technologies et les critères utilisés pour concevoir et évaluer molécules et procédés continueront d'évoluer. Cette dynamique donne une importance particulière à la formation continue, également identifiée comme une priorité possible d'une prochaine phase du programme CMA. La transformation de l'industrie chimique ne pourra en effet pas reposer uniquement sur les futurs diplômés : chercheurs, ingénieurs et techniciens actuellement en activité devront eux aussi intégrer progressivement de nouvelles ressources, de nouveaux procédés et de nouvelles méthodes d'évaluation.

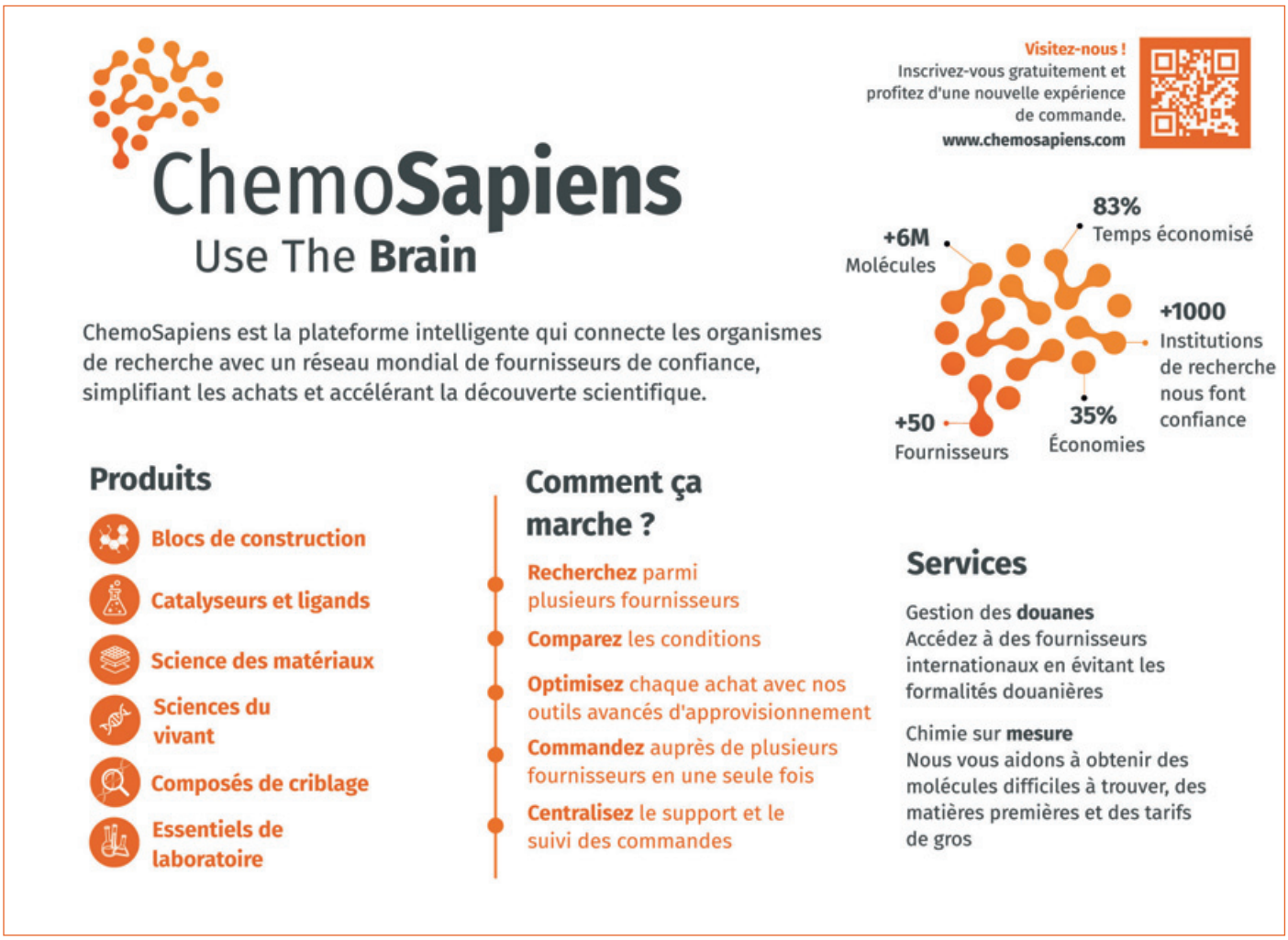
La formation constitue ainsi l'une des conditions permettant de transformer les avancées scientifiques et technologiques en réalités industrielles. Une électricité bas-carbone ne devient un avantage que si les procédés permettant de l'utiliser sont développés. La diversification des matières premières suppose de savoir transformer et évaluer de nouvelles ressources. Les outils numériques et l'intelligence artificielle ne prennent pleinement leur sens qu'associés à une compréhension solide de la chimie et des contraintes industrielles.

Les journées nationales CMA auront ainsi dépassé le seul bilan d'un programme de formation. Les notions de mutation, de pérennisation et de prospective renvoient directement aux transformations auxquelles la chimie est confrontée. Celles-ci ne reposeront vraisemblablement pas sur une technologie ou une ressource unique, mais sur la combinaison de nouvelles sources de matières premières, de nouvelles voies de transformation et de nouveaux outils d'évaluation. Dans cette évolution, la chimie verte fournit un cadre pour réduire les impacts des pratiques actuelles, mais aussi pour concevoir et anticiper les solutions appelées progressivement à les compléter ou à les remplacer.

Références

- C. Buyck, « *Les projets CMA sont "une réussite" mais le "gros échec" reste "l'insuffisant taux de remplissage" (Bruno Bonnell, SGPI)* », *AEF info*, dépêche 756924, 18/09/**2026**.
- Secrétariat général pour l'investissement, *Présentation du dispositif Compétences et métiers d'avenir*, www.info.gouv.fr/organisation/secretariat-general-pour-l-investissement-sgpi/competences-et-metiers-d-avenir-presentation
- ANR, *France 2030, Compétences et Métiers d'Avenir : clôture de la Saison 2 et annonce de 40 nouveaux lauréats*, 19/09/**2025**, https://anr.fr/fr/actus/details/news/france-2030-competences-et-metiers-davenir-cloture-de-la-saison-2-et-annonce-de-40-nouveaux-laur

La rubrique « Chimie Verte Insights » est coordonnée par Grégory CHATEL (gregory.chatel@univ-smb.fr). Elle est en téléchargement libre sur www.lactualitechimique.org



La Société Canadienne de Chimie et la Société Chimique de France : une collaboration pour la science et la langue

Florent LOUIS, Jérôme CLAVERIE et Pierre HIRCHENHAHN

Malgré les liens historiques et surtout linguistiques qui unissent le Canada et la France, il n'existait pas d'accord entre la Société Canadienne de Chimie (SCC) et la Société Chimique de France (SCF). Ce manque est maintenant comblé par la signature d'un accord de coopération le 28 mai 2026. Retour sur la construction de cet accord et ce qu'il contient avant de donner la parole à nos amis canadiens pour se présenter.

Construction d'un accord historique

Florent Louis, enseignant-chercheur à l'Université de Lille, membre de la SCF et responsable communication pour le bureau de la section régionale Hauts-de-France, a été l'initiateur de cet accord. Il a participé pour la première fois au congrès de la SCC à Calgary en 2022, amorçant une collaboration avec Nadine Borduas-Dedekind à l'Université de Colombie-Britannique. Grâce au soutien de l'Ambassade de France au Canada et de ses consulats généraux à Vancouver et à Toronto, Florent Louis a pu nouer de nombreux contacts au sein de la division Environnement lors des congrès de la SCC à Vancouver (2023) et Winnipeg (2024), et initier de nouvelles collaborations en chimie de l'environnement avec Roxana Suehring de Toronto Metropolitan University, Xianming Zhang de l'Université Concordia, Tara Kahan de l'Université du Saskatchewan et Pedro A. Segura de l'Université de Sherbrooke. Les premiers échanges avec la secrétaire exécutive de l'Institut de Chimie du Canada ont eu lieu en 2023. Dès lors, Florent Louis a contacté le conseil d'administration de la SCF par l'intermédiaire de son collègue Éric Marceau, enseignant-chercheur à l'Université de Lille.
Un comité franco-canadien soutenant cette initiative a été constitué en 2025. Il comprend 27 membres : onze pour la SCF – Abderrahmane Amgoune (Univ. Lyon 1), Carine Clavaguera (Univ. Paris Saclay), Sami Lakhdar (Univ. Toulouse), Florent Louis (Univ. Lille), Frédéric Meunier (Univ. Lyon 1), Jonathan Potier (Univ. Lille), Pascal Roussel (Univ. Lille), Antoine Simmoneau (Univ. Toulouse), Sonia Taamali (Univ. Lille), Yann Trolez (ENSC Rennes), Sébastien Vidal (Univ. Paris Saclay) – et seize pour la SCC – Alexander Baker (Dalhousie Univ.), Nadine Borduas-Dedekind (Univ. British Columbia), Jérôme Claverie (Univ. Sherbrooke), Mita Dasog (Dalhousie Univ.), Marcus Drover (Western Univ.), Yves Gelinas (Concordia Univ.), Tara Kahan (Univ. Saskatchewan), Francesca Kerton (Memorial Univ. of Newfoundland and Labrador), Bryan Koivisto (Toronto Metropolitan Univ.), Jan Kopyscinski (Mc Gill Univ.), Audrey Laventure (Univ. Montréal), Daniel Leznoff (Simon Fraser Univ.), Jennifer Love (Univ. Calgary), Tim Storr (Simon Fraser Univ.), Juliana Vidal (Beyond Benign), Xianming Zhang (Concordia Univ.).

À la suite de nombreux échanges, un accord de collaboration entre les deux sociétés a été rédigé et il a été ratifié en différé avec la signature de la SCF à Paris et la signature canadienne lors du congrès de la SCC à Toronto en mai 2026 [1]. Ceci a été possible grâce au soutien de l'Ambassade de France au Canada *via* son consulat général à Toronto et du bureau du CNRS au Canada. Le lancement de cet accord a été intégré à un symposium du congrès de la SCC en mai dernier organisé pour la première fois en langue française à l'initiative du président de la SCC Jérôme Claverie.

Un accord plein d'opportunités pour les membres de la SCF

L'accord s'articule autour de cinq axes. Le premier concerne la promotion de la chimie au sens large par la coopération et le développement d'activités et de programmes de sensibilisation en commun. Le deuxième axe est centré sur l'organisation et la réalisation d'actions communes sur les thématiques de la chimie durable, l'environnement, la chimie industrielle et les matériaux. Le troisième axe encourage la collaboration en matière de développement professionnel et de formation, en particulier pour les chimistes en début de carrière, dans des domaines liés à l'innovation et au leadership. Le quatrième axe concerne la participation aux événements. Il est prévu que les membres de la SCF bénéficient du tarif membre de la SCC pour participer aux événements organisés par la SCC et vice versa, les membres de la SCC bénéficieront du tarif membre SCF à nos événements. Le cinquième axe est de promouvoir les



Signature de l'accord le 28 mai 2026 à Toronto et à Paris. De gauche à droite : Xavier Bataille (secrétaire général de la SCF), Gilberte Chambaud (présidente de la SCF), Jacques Maddaluno (chargé de mission relations internationales de la SCF), Alex Brown (*past-president* de la SCC) et Jérôme Claverie (président de la SCC).

événements, les programmes, produits et services pertinents auprès de la société partenaire. Vous verrez donc des informations sur les activités de la SCC commencer à apparaître dans la newsletter de la SCF et bien entendu dans *L'Actualité Chimique*.
Cet accord ne peut vivre que si les membres des deux sociétés s'en emparent. Profitez-en pour participer aux conférences organisées par la SCC, nouer des liens et prendre part aux échanges scientifiques et culturels entre nos deux nations.
Nous tenons à remercier l'Ambassade de France au Canada et ses services consulaires pour leur soutien constant ayant abouti à cet accord, et plus particulièrement Géraldine Dantelle, Rosalie Prat, Jean-François Doulet et Grégoire Dusseux.



Pierre Hirchenhahn (vice-président SCF et vice-président du RJ) et Jérôme Claverie (président de la SCC) présentent l'accord lors de la conférence annuelle de la SCC. Photo : Institut de Chimie du Canada.

Mot de Jérôme Claverie, président de la SCC

La Société Canadienne de Chimie est une société savante sans but lucratif qui rassemble des professionnels issus des milieux universitaire, industriel, gouvernemental et de l'enseignement afin de promouvoir l'avancement des sciences chimiques et de soutenir la communauté de la chimie partout au Canada. Bien qu'elle ne puisse se prévaloir du même héritage historique que la Société Chimique de France, la SCC s'inscrit néanmoins dans une tradition plus que centenaire. Ses racines remontent à 1921 avec la création de l'Institut de Chimie du Canada (ICC), organisme qui chapeaute aujourd'hui à la fois la SCC et la Société Canadienne de Génie Chimique.
Forte de plus de 3 000 membres, la SCC offre à la communauté chimique canadienne un large éventail de services et d'activités. Elle administre notamment un programme national de labellisation des programmes universitaires de premier cycle en chimie, attribue de nombreux prix et distinctions soulignant l'excellence scientifique, et soutient activement un réseau de sections étudiantes et de sections locales réparties à travers le pays.


De gauche à droite : Kathryn Preuss (vice-présidente de la SCC), Suzie Bronner (bureau CNRS à Ottawa), Jérôme Claverie (président de la SCC), Pierre Hirchenhahn (vice-président SCF et vice-président du RJ), Florent Louis (chargé de communication section Hauts-de-France et Division Chimie Physique) et Grégoire Dusseux (chargé de projet au consulat général de Toronto). Photo : Institut de Chimie du Canada.

L'activité phare de la Société demeure son congrès annuel, qui rassemble généralement entre 2 000 et 3 000 participants. L'édition de 2027 revêtira un caractère tout particulier puisqu'elle sera jumelée au Congrès mondial de chimie de l'IUPAC. Cet événement d'envergure internationale se tiendra à Montréal du 11 au 16 juillet. Les membres de la SCF y seront chaleureusement accueillis. Afin de souligner les liens qui unissent nos communautés scientifiques francophones, nous organiserons également une réception de réseautage (ce que nous appelons « un 5 à 7 ») spécialement destinée aux congressistes francophones. D'ailleurs, depuis la signature du protocole d'entente entre nos deux sociétés, les membres de la SCF bénéficient des mêmes tarifs préférentiels d'inscription que les membres de la SCC.
Parmi les quelque 41 millions de Canadiens, plus de dix millions ont le français comme langue maternelle ou langue d'usage. Cette réalité confère au français une place essentielle dans le paysage scientifique canadien. Pourtant, pendant de nombreuses années, les activités de la SCC étaient offertes presque exclusivement en anglais. Consciente de l'importance de mieux représenter la dualité linguistique du Canada, la Société a entrepris un virage majeur au cours des dernières années. Ainsi, lors de son congrès annuel de 2026 à Toronto, il était pour la première fois possible de présenter l'intégralité de ses travaux en français. L'accord de coopération signé récemment avec la SCF s'inscrit dans cette même volonté d'ouverture vers la francophonie scientifique internationale. Cet accord vient compléter les relations historiques entretenues avec plusieurs grandes sociétés savantes anglophones, notamment la Royal Society of Chemistry (RSC) au Royaume-Uni et l'American Chemical Society (ACS) aux États-Unis.
Nous souhaitons ardemment que cette collaboration entre la SCF et la SCC continue de se développer dans les années à venir. Après tout, nous partageons deux passions fondamentales : la chimie et la langue française. Dans le contexte international actuel, ce sont là deux liens précieux. À nos collègues français, nous lançons donc une invitation chaleureuse : venez présenter vos travaux à Montréal lors du congrès conjoint SCC-IUPAC de juillet 2027 et contribuer, avec nous, au rayonnement de la chimie francophone à l'échelle mondiale !

[1] https://ottawa.office.cnrs.fr/signature-dune-entente-de-cooperation-entre-la-societe-chimique-de-france-et-linstitut-de-chimie-du-canada

Publications : l'envol de la Chine

Philippe COLOMBAN

Directeur de recherche émérite au CNRS, Laboratoire MONARIS (UMR 8233), Sorbonne Université, Paris.
✉ philippe.colomban@sorbonne-universite.fr

Dégradation des indicateurs en France

Le démarrage de la campagne présidentielle incite à se pencher sur l'évolution de l'enseignement, et plus généralement de la place de la France dans le monde. À l'école primaire, comme le montre l'enquête de l'OCDE de comparaison 2019-2023, les écoliers français du CM1 sont avant-derniers en mathématiques [1] et en chute depuis l'étude précédente ! Dans le classement PISA comparant les niveaux entre 2018 et 2023 des élèves de quinze ans, la France est à la 23^{e} place, avec une des chutes les plus importantes [2], alors qu'elle reste dans la moyenne pour l'argent dépensé dans l'éducation [3].
Qu'en est-il de la recherche ? Un article de 2022 de *La revue géopolitique* donnait une carte comparant les développements des soutiens à la recherche des pays européens [4] : se détachaient la Pologne, la Grèce, le Portugal, l'Estonie et la Hongrie pour l'importance des efforts financiers. Si on compare les pourcentages du PIB consacrés à la recherche, la France est dans la moyenne européenne, avec 2,1 % en 2022, mais à un niveau bien inférieur à ceux de la Corée du Sud (4,9 %), Israël (4,1 %), les États-Unis (3,46 %), la Belgique et la Suède (3,4 %), le Japon (3,34 %), l'Autriche (3,2 %) et l'Allemagne (3,1 %) [5]. Il y a plusieurs années, l'objectif de 3 % avait été formulé par l'Union européenne. En 2023, l'effort recherche de l'État chute à son plus bas niveau depuis 1980 (0,74 %) [6]. Les supports varient presque d'un facteur dix selon les régions, les trois plus importants étant Midi-Pyrénées, l'Ile-de-France et la Franche-Comté en 2012 [7]. Les chiffres globaux plus récents ne sont pas connus, mais le blocage des crédits ne doit pas améliorer la situation.

Les publications, une mesure de l'activité de recherche

La petite musique distillée par certaines autorités sur le trop de publications et la suppression de l'accès au meilleur instrument de mesure et de comparaison qu'était Web of Science™ [8] n'efface pas que les principaux indicateurs de l'efficacité de l'activité « recherche » sont le nombre de publications et de brevets, de leurs citations et… des facteurs bibliométriques. Le nombre de publications est donc considéré dans de nombreux pays comme une mesure de la productivité et peut même être un facteur pour le recrutement et la rémunération. Le pari étant fait que dans un grand nombre de publications, le nombre de celles réellement utiles sera plus fort. De toute façon, c'est sans discussion une mesure de l'activité de la communauté.

Méfiant sur les statistiques que l'on peut trouver sur le Net, j'utiliserai la méthode du sondage sur des données d'accès facile. Je prendrai comme indicateur l'origine nationale du premier auteur : un grand nombre de publications résultent de coopérations internationales, mais le premier auteur appartient en général à l'équipe maitre d'œuvre du travail et ayant le financement. Étant depuis de nombreuses années éditeur de plusieurs journaux dans des disciplines variées (*J. Raman Spectrosc.* (Wiley), *Materials* (MDPI) et *Heritage Science* (Nature-Springer)), le travail au jour le jour me démontrant le rôle dominant et croissant de la Chine, j'ai voulu regarder plus précisément. Les domaines des contributions publiées dans ces journaux sont différents, le *Journal of Raman Spectroscopy* reçoit des articles spécialisés sur des problématiques assez fondamentales, *Materials* concerne plutôt des applications, tandis que *Heritage Science* s'intéresse aux études du patrimoine, à l'intersection avec les sciences humaines. Les domaines sondés sont donc très variés. Les *figures 1* à *3* comparent l'évolution des contributions depuis plusieurs décennies.

Les contributions visualisées sur la *figure 1* (*J. Raman Spectrosc.*) proviennent d'une trentaine de nations, mais principalement (plus de deux articles pour le mois utilisé pour le sondage) des États-Unis, de Chine, du Brésil, du Royaume-Uni, d'Allemagne et de France, c'est-à-dire des pays ayant fortement contribué au développement de la spectroscopie Raman depuis l'existence d'instruments efficaces (1975). La Chine est déjà bien présente à partir de 1990 du fait d'une production importante (montage) dans les pays de spectromètres Raman de marques non chinoises. Beaucoup de fabricants d'instruments concèdent que la Chine est devenu le principal marché pour l'instrumentation scientifique à partir des années 1990. En 1980, pour le mois choisi pour la comparaison, cinq pays contribuaient significativement au journal (États-Unis, Japon, Canada, Australie, Royaume-Uni et France) ; en tenant compte de l'ensemble de l'année, il faudrait ajouter l'Allemagne et le Brésil. On observe au fur et à mesure des années le déclin des États-Unis, de l'Allemagne et de la France et la montée de la Chine et plus modérément de l'Inde.

Le paysage est beaucoup plus contrasté pour le sondage concernant *Materials*. La *figure 2* montre que six pays contribuent fortement, avec au moins dix contributions pour certaines années : Chine (80), Pologne (28), Espagne (23) Corée (13) et Allemagne et États-Unis (10 chacun). Mais alors que la Chine passe d'une publication en 2010 à 80 en 2020, les États-Unis passent de 10 à 4. Le nombre de pays actifs passe de 13 à 35, montrant la montée en puissance de nouveaux pays. La France, qui passe de 1 à 4, est en-dessous de l'Allemagne (3 à 10), l'Italie (3 à 8), la Pologne (0 à 28) et l'Espagne (4 à 22). Bien que ces valeurs ne doivent être considérées que comme les indicateurs d'un sondage et non une vraie statistique, elles montrent la montée de pays comme la Pologne et l'Espagne,

voire l'Italie, et l'effacement de la France, en accord avec la carte indiquée plus haut sur la variation des efforts de soutien [4]. La domination de la Chine devient écrasante dans ce domaine de recherche en partie finalisée. Rappelons que la Chine met maintenant son effort sur le financement de la recherche fondamentale où sa domination est (pour le moment !) moins nette (*figure 1*).

La *figure 3* compare les contributions à *Heritage Science*. Dans le domaine des études des matériaux et objets du patrimoine et de leur conservation, l'Italie a été l'initiatrice de l'approche scientifique suite aux dégradations de son patrimoine artistique lors de l'inondation du fleuve Arno à Florence en 1966. Ainsi, l'Italie reste encore en 2013 un des principaux contributeurs du journal. Son importance est en fait minorée, car nombre de publications d'auteurs italiens sont publiées dans d'autres journaux, créés bien avant *Heritage Science* par des équipes italiennes. En 2013, la Chine est déjà aussi le principal contributeur. En 2020, la France fait encore partie du groupe dominant ce domaine, mais en dernière place, à égalité avec l'Iran : Chine (19 contributions), États-Unis (12), Italie (9), Danemark (6), Pays-Bas (5), Iran et France (4). En 2026, la domination chinoise est encore plus marquée.

Et demain ?

Les indicateurs examinés montrent quantitativement la dégradation de la place de la France et de nombreux pays « occidentaux » et une certaine accélération de cette dégradation. Est-ce pour rendre (consciemment ou inconsciemment ?) plus difficile la mesure de ce déclin qu'a été décidée la suppression de l'accès au « thermomètre », le Web of Science™ par le CNRS et les Universités [8] ? La conclusion d'une moindre érosion en recherche fondamentale est en accord

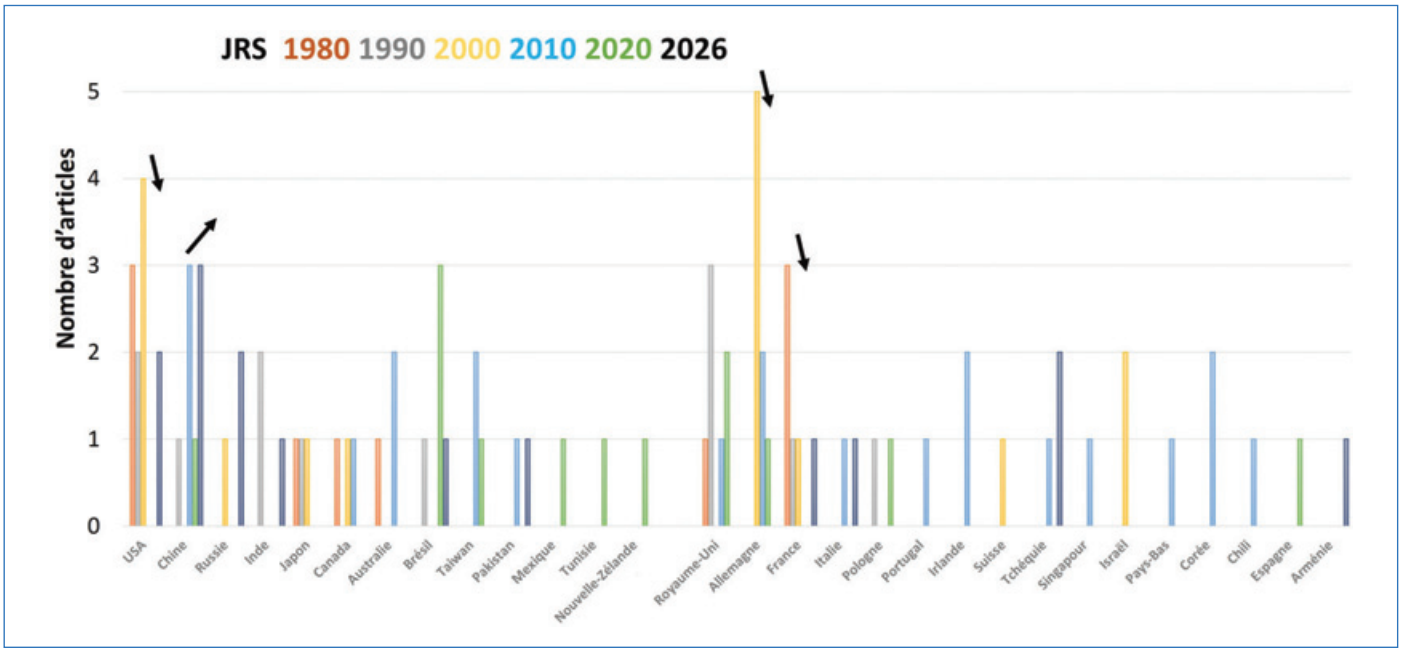


Figure 1 - Évolution de l'origine des articles parus dans le *Journal of Raman Spectroscopy* depuis 1980 (numéros de février).

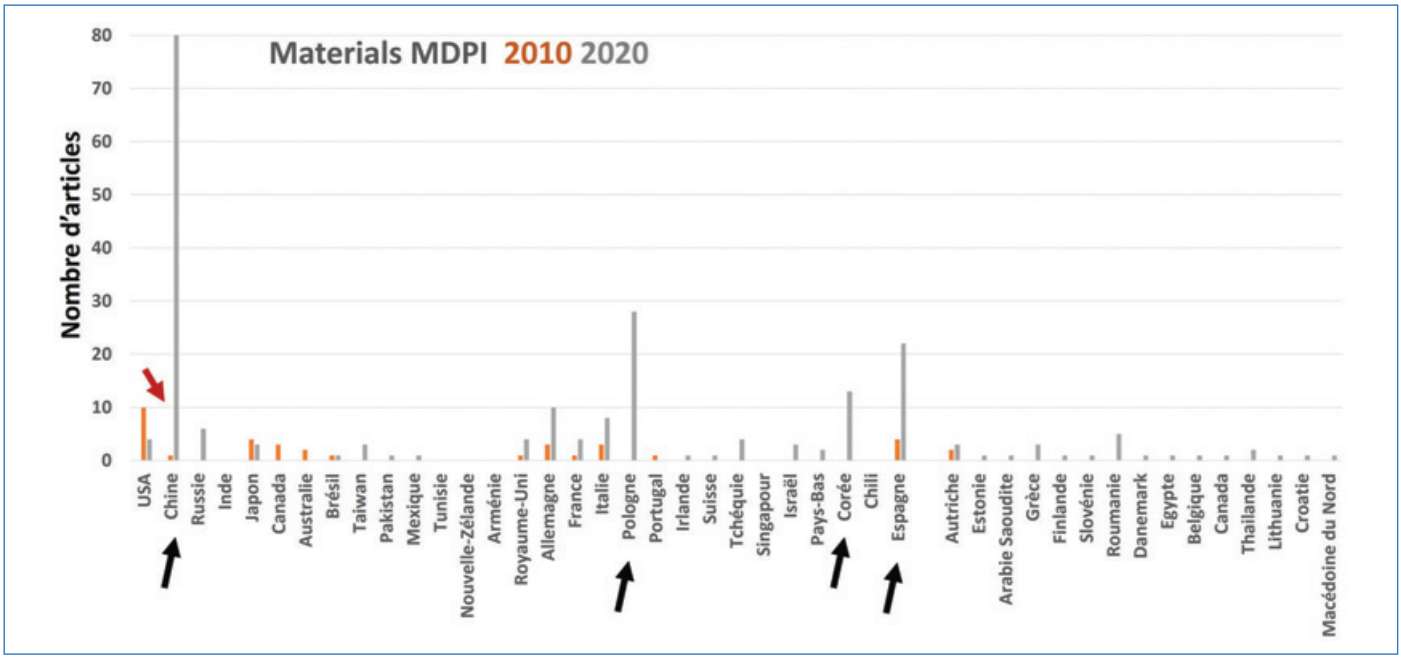


Figure 2 - Évolution de l'origine des articles parus dans *Materials* entre 2010 et 2020 (numéro de février).

avec les prix Nobel récemment obtenus par la France et d'autres pays occidentaux, prix reflétant en fait l'état de la recherche d'il y a plusieurs décades. L'affaiblissement dans les disciplines les plus proches des applications est sans doute aussi à relier à la disparition ou à la réduction des activités de recherches industrielles sur le sol français. L'internationalisation des grandes entreprises « françaises » et européennes conduit à monter des centres de recherche dans les zones en croissance où sont les clients et à diminuer le rôle des centres localisés en Europe. Les indicateurs des trois figures montrent le même déclin pour le Royaume-Uni, et dans une certaine mesure pour l'Allemagne, et la montée de la Pologne et des États-Unis, tout ceci en accord avec les critères macroéconomiques. Les statistiques sur le nombre d'ingénieurs en formation mettent aussi en évidence que l'Inde et la Chine sont le vivier de demain. Une étude concernant l'ensemble des domaines de recherche reste à faire mais la recherche en France est à la croisée de chemins.

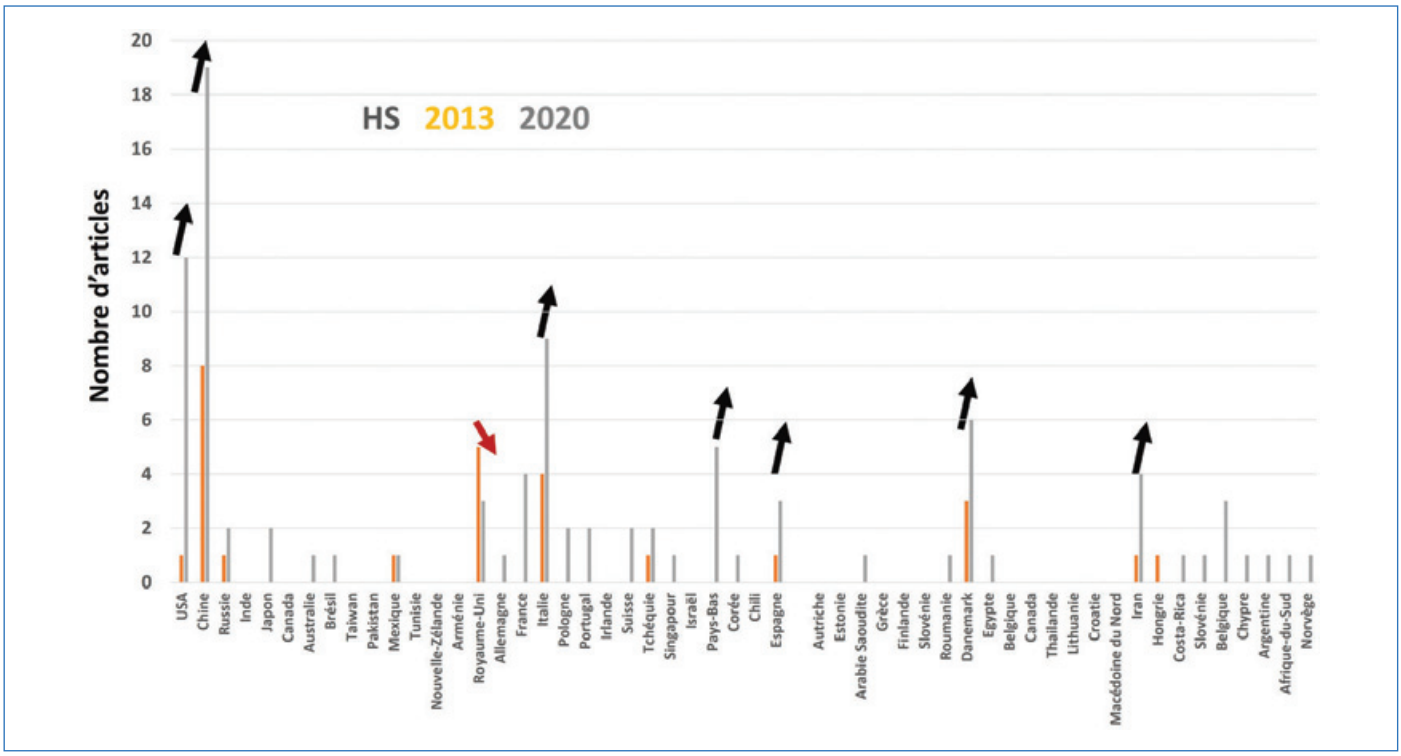


Figure 3 - Évolution de l'origine des articles parus dans *Heritage Science* en 2013 et 2020 (année).

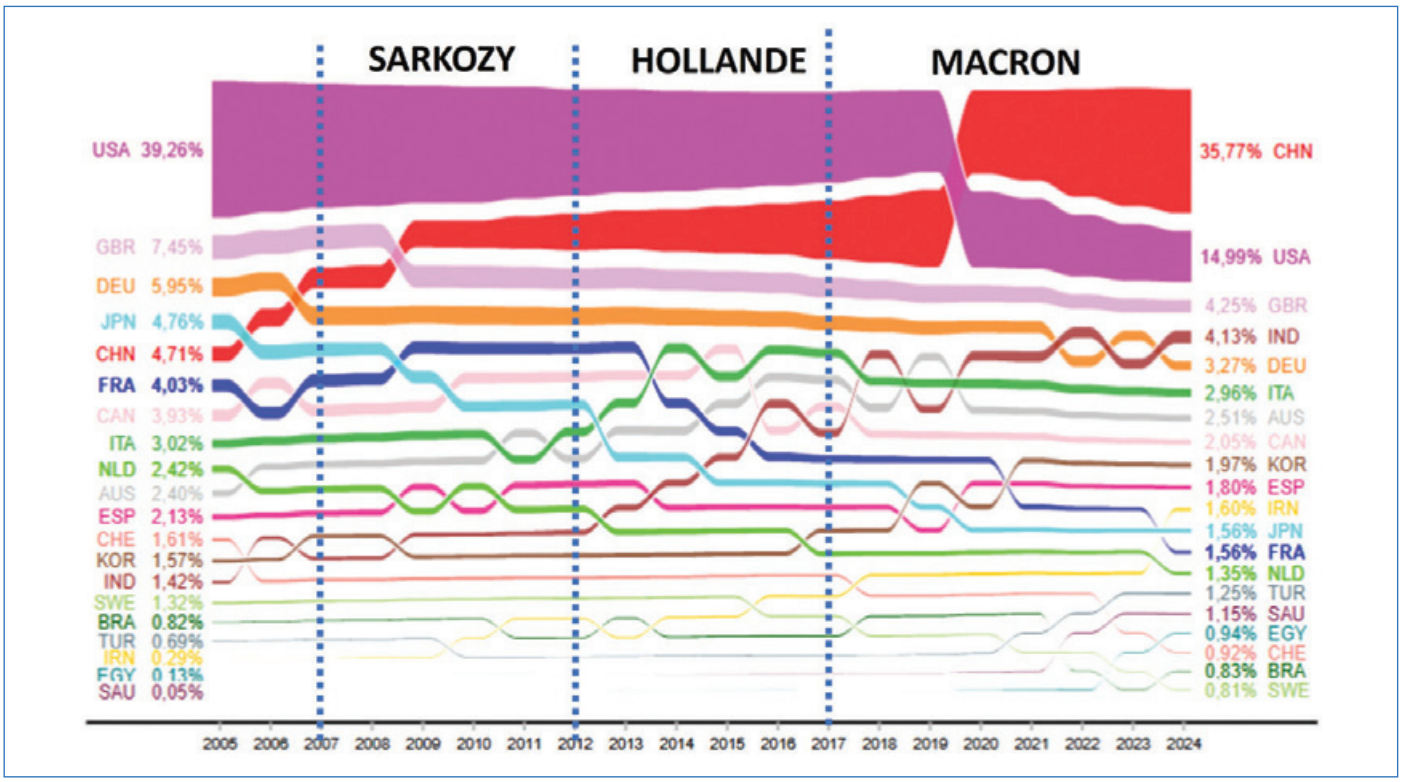


Figure 4 - Comparaison de la figure extraite du rapport de l'OST-Hcéres donnant la part mondiale dans le décile des publications les plus citées toutes disciplines confondues par pays et par année [9] avec les dates des derniers septénats.

Le rapport dressé par l'Observatoire des sciences et techniques (OST-Hcéres) en juillet dernier analyse la place de la France [9]. Cette situation a été discutée dans les commissions parlementaires [10]. La mobilisation autour des Assises pour l'Université et pour la Recherche en cette fin d'année [11], avec son *motto* « *Ce dont nous rêvons, ce que nous voulons* », donne une occasion de reformuler les liens Société Civile – Transmission – Préparation du Futur au travers de la définition des actions à entreprendre pour progresser à nouveau. Des progressions importantes sont possibles, comme le montre la *figure 4* extraite du rapport OST-Hcéres [9] où l'on voit la forte amélioration qui a suivi la création de l'Agence d'évaluation de la recherche et de l'enseignement supérieur (AERES) qui engendra une dynamique du fait probablement des classements rigoureux et de l'effort du soutient étatique, passé de 2,03 % du PIB en 2007 à 2,27 % en 2014 [12] après une chute quasi régulière depuis 1996.

[1] T. Ģakmak, AA, **2024**, www.aa.com.tr/fr/monde/le-niveau-en-math%C3%A9matiques-des-%C3%A9l%C3%A8ves-de-cm1-place-la-france-en-derni%C3%A8re-position-en-europe/3413734

[2] F. Gouaillard, *Le Parisien*, **2023**, www.leparisien.fr/societe/resultats-pisa-le-niveau-des-eleves-degringole-en-maths-et-en-francais-05-12-2023-XBDMO23BDRETRDSARQLVBZL7NY.php

[3] T. Gaudiaut, *Echo du Mardi*, **2021**, www.echodumardi.com/actualite/education-combien-coute-un-eleve/?print=print

[4] C. Bezamat-Mantes, P. Verluise, *La revue géopolitique*, **2022**, www.diploweb.com/Carte-et-graphique-Quelles-dynamiques-de-la-recherche-et-developpement-dans-l-Union-europeenne.html

[5] H. Milhavet-Birlouez, Melchior, **2023**, www.melchior.fr/actualite/actu-eco-les-depenses-de-recherche-et-developpement-dans-ue

[6] docmeup, Recherche française : un signal d'alerte, 8 juillet **2026**, www.instagram.com/p/Daijv9gCBCu

[7] *La Revue du Projet*, **2015**, https://projet.pcf.fr/77434

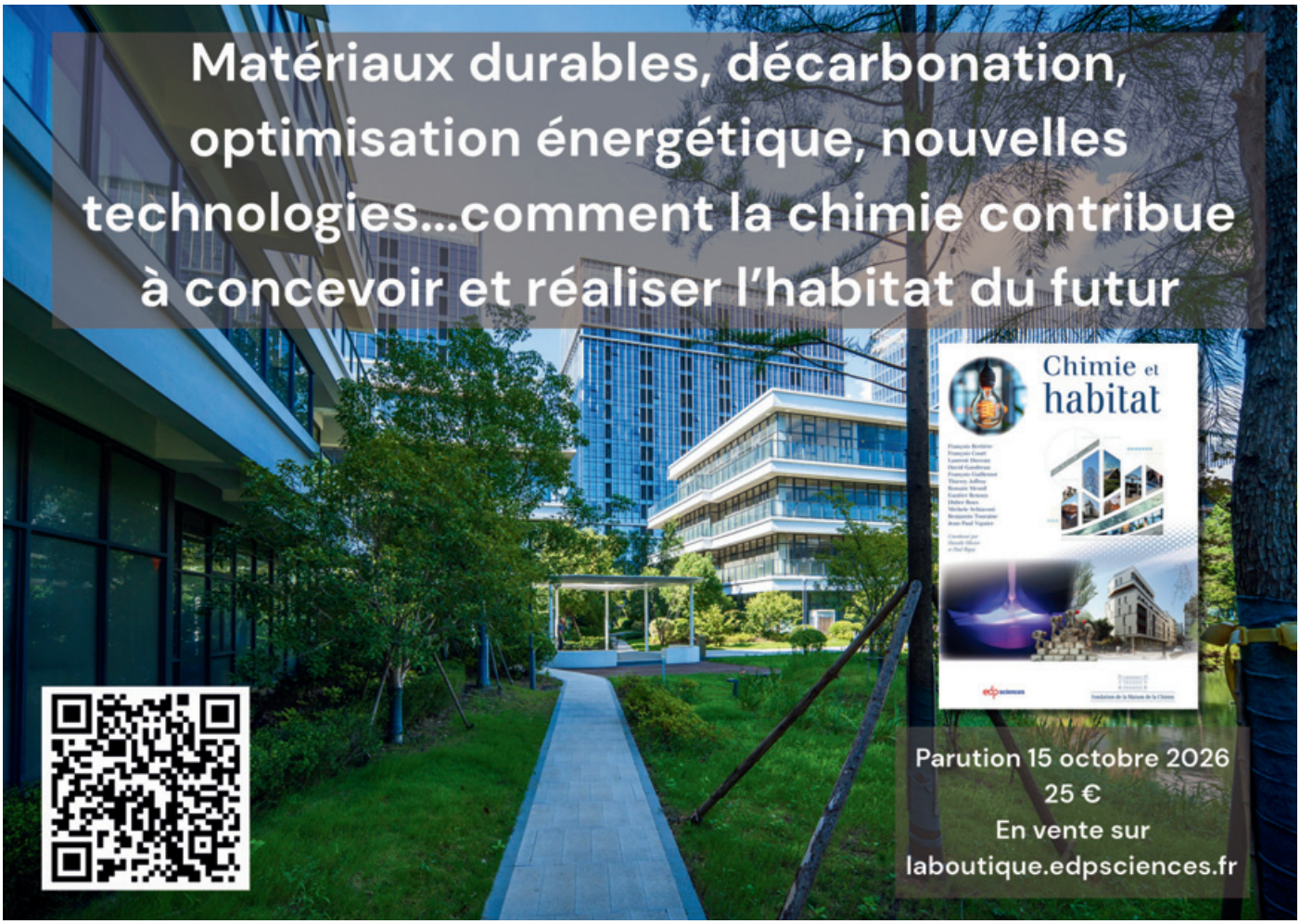
[8] P. Colomban, Que dit la coupure de l'accès au Web of Science par le CNRS sur les pratiques de la recherche et son évaluation en France ?, *L'Act. Chim.*, **2026**, *511*, p. 10-13, https://new.societechimiquedefrance.fr/numero/que-dit-la-coupure-de-lacces-au-web-of-science-par-le-cnrs-sur-les-pratiques-de-la-recherche-et-son-evaluation-en-france-p10-n511

[9] N Carayol, M. Amdaoud, A. Lahatte, OST-Hcéres, La France dans la compétition scientifique mondiale : radioscopie d'un décrochage ?, juil. **2026**, www.hceres.fr/fr/france-competition-mondiale

[10] Assemblée nationale, Bilan des politiques de recherche en France depuis 2006, mai **2026**, https://videos.assemblee-nationale.fr/video.18946477_6a0d60a5608d8.commission-des-affaires-culturelles--bilan-des-politiques-de-recherche-en-france-depuis-2006--acqu-20-mai-2026

[11] Assises pour l'Université et pour la Recherche, **2026**, https://agorasur.fr/assises-pour-luniversite-et-pour-la-recherche

[12] Banque Mondiale, https://donnees.banquemondiale.org/indicateur/GB.XPD.RSDV.GD.ZS?locations=FR



Transformation photochimique de pyridines et 1,2-diazépines

Clément GHIAZZA

Institut Lavoisier de Versailles UMR 8180, Université Versailles St-Quentin-en-Yvelines, Université Paris-Saclay, CNRS, 45 avenue des États-Unis 78000 Versailles, France.
✉ clement.ghiazza@uvsq.fr

Résumé Cet article retrace les principaux jalons ayant conduit à l'élaboration d'un protocole standardisé et ne nécessitant pas l'isolement des intermédiaires permettant la conversion de pyridines en 1,2-diazépines. En intégrant un réarrangement photochimique découvert à la fin des années 1960 par Jacques Streith à un processus multi-étapes, l'extension des cycles pyridines par insertion d'un atome d'azote a été mise au point. Ces molécules encore peu connues ont alors fait l'objet de plusieurs transformations. Enfin, des expériences dédiées à élucider le mécanisme de la réaction confirment les premières hypothèses proposées il y a presque 60 ans.

Mots-clés **1,2-Diazépine, pyridine, hétérocycle, photochimie, déaromatisation.**

Abstract **Bringing 1,2-diazepine back to center stage**
This article traces the major milestones that led to the development of a one-pot, standardized protocol for the conversion of pyridines into 1,2-diazepines. By implementing a photochemical rearrangement discovered in the late 1960s by Jacques Streith into a multistep process, the ring expansion of pyridines through nitrogen atom insertion was achieved. These still little-known molecules were subsequently subjected to several transformations. Finally, mechanistic experiments support the initial hypotheses proposed nearly 60 years ago.

Keywords **1,2-Diazepine, pyridine, heterocycle, photochemistry, dearomatization.**

https://doi.org/10.63133/scf.act-chim.2026.519.01

Contexte

Dire que la chimie des hétérocycles, omniprésents au sein des molécules bioactives, est un domaine d'étude d'intérêt serait un euphémisme [1,2]. L'importance capitale de ces briques élémentaires peut être illustrée à bien des égards, que ce soit pour l'industrie pharmaceutique, agrochimique ou les matériaux organiques. Il suffit de constater que, sur les 33 petites molécules approuvées par la FDA (Food and Drugs Administration) en 2025, 28 contiennent au moins un hétérocycle [3].
Si virtuellement tout cycle carboné comprenant au moins un hétéroatome peut être considéré comme un hétérocycle, la réalité est bien moins variée que ne le suggère cette définition. En effet, la vaste majorité des hétérocycles les plus représentés dans les molécules bioactives est constituée de cycles contenant 5 à 6 atomes de carbone et d'azote. Ainsi, il n'est pas rare de retrouver les motifs pyridine, pyrimidine, pyrrole ou imidazole, ainsi que leurs analogues saturés. En revanche, les hétérocycles à sept chaînons sont bien moins représentés, et souvent perçus comme exotiques, à l'exception des dérivés benzodiazépines.
À la vue de cette liste non exhaustive, un second constat émerge : beaucoup des cycles rencontrés sont aromatiques. Dans son célèbre article « Escape from Flatland » de 2009, Lovering a pu établir un lien entre la potentielle activité d'une molécule et la complexité de ses éléments constitutifs [4]. En effet, la complexité d'une molécule est définie par son degré de saturation, sa tridimensionnalité, ainsi que la présence d'éléments stéréogènes. La tendance serait donc plutôt à la réduction du caractère aromatique de molécules plates et π-conjuguées pour accroître les chances de succès clinique [5-7]. C'est dans ce contexte que s'inscrivent les réactions de déaromatisation comme l'hydrogénation catalytique ; c'est-à-dire augmenter la complexité d'une molécule telle que définie par Lovering tout en préservant une taille/un volume, une géométrie et un poids moléculaire semblables.

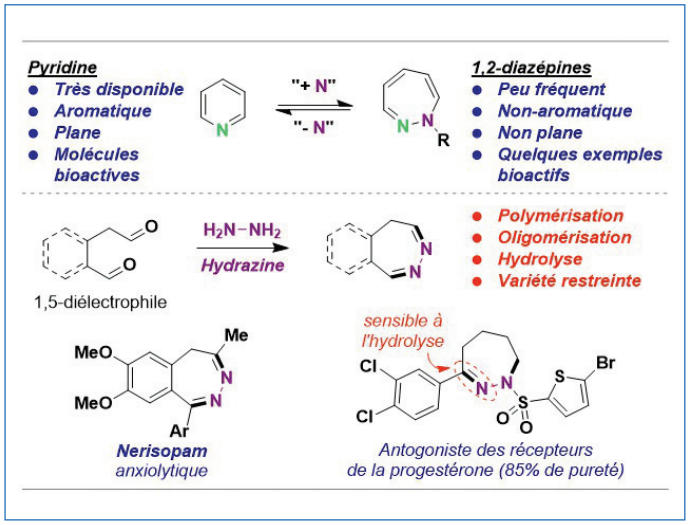


Figure 1 - Comparaison entre pyridine et 1,2-diazépines.

Et les hétérocycles de taille moyenne ?

À l'inverse de leurs homologues à six chaînons, les hétérocycles insaturés à sept chaînons, comme les 1,2-diazépines, ne sont pas aromatiques comme le prévoit la règle de Hückel [8]. Seul un atome d'azote supplémentaire au sein du cycle les distinguent, pourtant leurs propriétés géométriques sont bien différentes de la pyridine. Ainsi, tout comme ses isomères de position, le cycle de la 1,2-diazépine n'est pas plan et adopte une conformation pseudo-bateau (*figure 1*).

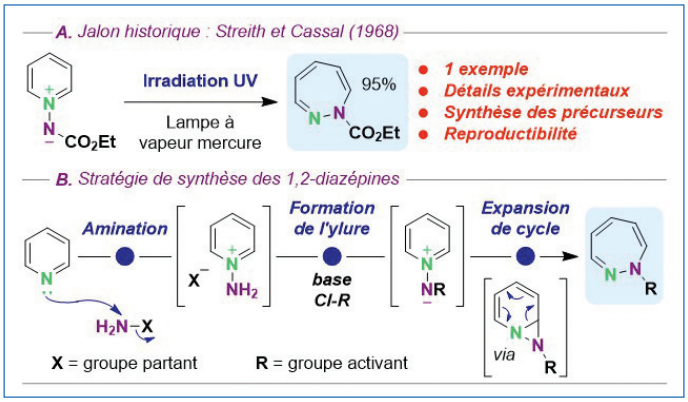


Figure 2 - Vers une voie de synthèse photochimique des 1,2-diazépines à partir de pyridines.

Avant la parution de nos travaux [9-11], la préparation de 1,2-diazépines reposait presque essentiellement sur la condensation de dérivés de l'hydrazine sur des composés 1,5-diélectrophiles, avec les écueils inhérents à cette stratégie de synthèse (oligomérisation, poly-alkylation, ouverture du cycle par hydrolyse de l'imine formée…). C'est pourquoi seuls quelques benzodiazépines trouvent leur place parmi les composés d'intérêts bioactifs, et sont prescrits dans le traitement des troubles bipolaires et anxieux. La présence du cycle benzénique permet de rigidifier l'intermédiaire réactionnel, ce qui facilite la cyclisation avec l'hydrazine. En revanche, le challenge restait entier pour les 1,2-diazépines monocycliques.

Ainsi, nous nous sommes demandé si les 1,2-diazépines ne pourraient pas être préparées plus simplement à partir de dérivés comportant un noyau pyridine, qui présentent l'avantage d'être abondants, facile à synthétiser, et omniprésents dans de nombreuses molécules bioactives. En mettant au point une séquence réactionnelle visant à insérer sélectivement un atome d'azote au cœur de la pyridine, nous serions en mesure, d'une part, de désaromatiser ce cycle aromatique, et d'autre part, de synthétiser un analogue d'intérêt comportant un hétérocycle peu fréquent en son sein.

Il est impossible d'évoquer les 1,2-diazépines sans mentionner le nom de Jacques Streith, pionnier français de la synthèse photochimique de ces hétérocycles [12,13], disparu en 2023. Les travaux qu'il a menés dès la fin des années 1960 ont indubitablement inspiré les recherches que nous menons actuellement. Ainsi, il montrait avec Cassal que, sous lumière UV générée par une lampe à mercure, l'irradiation directe d'un ylure de 1-aminopyridinium conduisait à la 1,2-diazépine avec un excellent rendement (*figure 2A*). Depuis, d'énormes progrès ont été réalisés pour faciliter et améliorer la synthèse des précurseurs. De plus, la photochimie s'étant significativement répandue, l'appareillage s'est standardisé afin d'assurer la reproductibilité des résultats. Ce réarrangement serait intégré dans un processus en trois étapes (*figure 2B*) :

1. l'amination de la pyridine avec un réactif adéquat dont l'atome d'azote serait électrophile ;
2. la formation de l'ylure en présence d'une base et d'un réactif permettant l'activation ;
3. le réarrangement (photochimique) rendant possible la conversion des pyridines en 1,2-diazépines.

Résultats préliminaires

En synthèse photochimique par irradiation directe, il est primordial d'évaluer la longueur d'onde à laquelle un substrat donné absorbe. L'étude photo-physique d'un panel

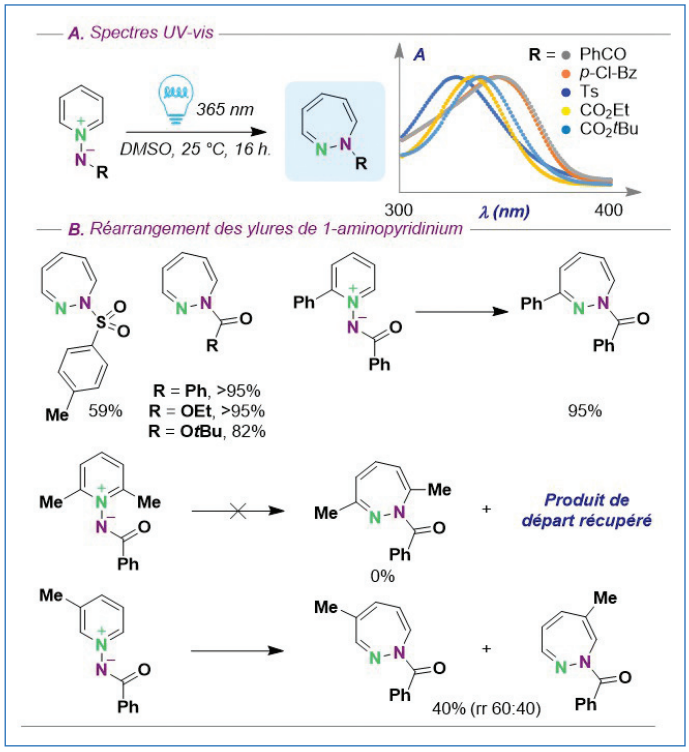


Figure 3 - Propriétés photo-physiques, influence des paramètres électroniques et stériques (rr : ratio régioisomérique).

représentatif de cinq ylures de 1-aminopyridinium a été réalisée et leur spectre d'absorbance UV-vis a révélé que tous absorbent la lumière entre 300 et 400 nm avec un optimum autour de 340 nm (*figure 3A*). Ainsi, en irradiant sélectivement ces composés avec une lampe émettant à 365 nm, le réarrangement en 1,2-diazépine peut être déclenché. Cette tendance se généralise à plusieurs ylures portant divers groupements activant (benzoyle, arylsulfonyle ou encore formiate). De manière générale, plus le substituant porté par l'atome d'azote exocyclique est électrodéficient, plus le réarrangement est lent, se traduisant par des rendements faibles à modérés. Ainsi, le choix s'est porté sur le chloroformiate d'éthyle, alliant à la fois efficacité et stabilité du produit formé. En termes de substitution du noyau pyridine, la réaction est possible lorsqu'au moins une des positions 2 ou 6 n'est pas occupée. À noter que les pyridines substituées en position 3 donnent un mélange de deux régioisomères dont la distribution inégale peut être rationalisée par la demande stérique plus importante lorsque que l'insertion a lieu du côté le plus encombré (*figure 3B*).

Une fois le réarrangement maîtrisé, l'optimisation des conditions réactionnelles pour l'amination électrophile de la pyridine, ainsi que pour la formation de l'ylure, ont été entreprises. En seulement quelques heures et selon un protocole séquentiel où chaque réactif est ajouté dans le même milieu réactionnel, il est possible de convertir efficacement la pyridine en 1,2-diazépine avec des rendements autour de 80 %. Dans ce cadre, la *O*-(mesitylsulfonyl)hydroxylamine ou MSH a été considérée pour réaliser la première étape d'amination dans des conditions douces. Cette espèce étant stabilisée sous forme d'hydrate, il est essentiel d'ajouter du tamis moléculaire (4 Å MS) au milieu réactionnel pour contrôler la teneur en eau du système. Une fois cette première étape terminée, il suffit d'ajouter un léger excès de chloroformiate d'éthyle ($ClCO_2Et$), d'une base organique comme la triéthylamine (NEt_3) et d'irradier le mélange à 365 nm pendant une nuit pour observer la formation du produit.

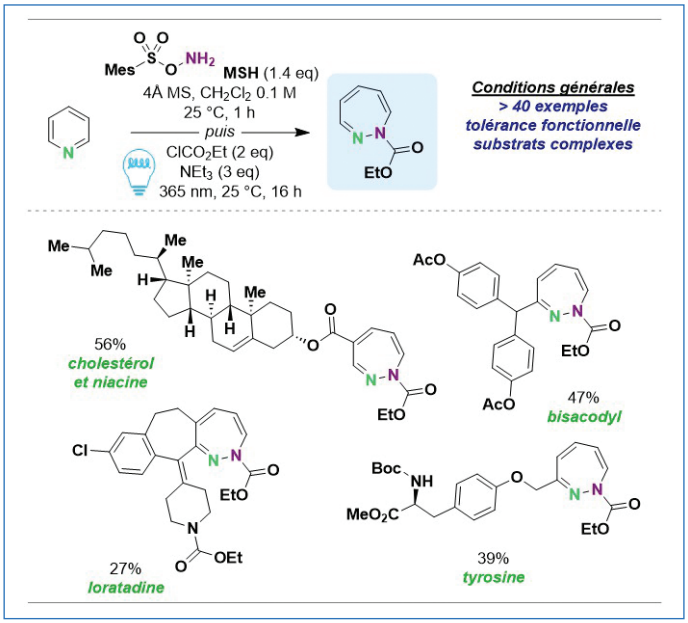


Figure 4 - Champ d'application de la méthodologie développée.

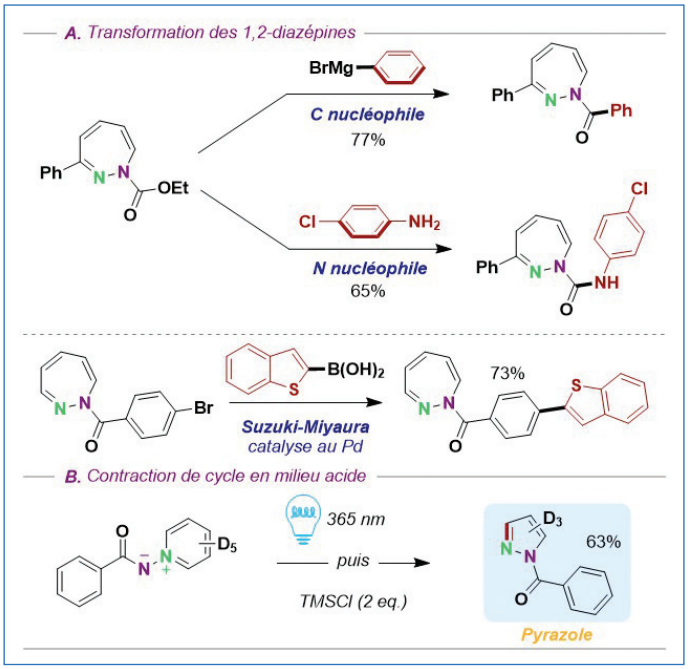


Figure 5 - Utilisation et transformation des 1,2-diazépines.

Une fois la séquence maîtrisée, le champ d'application a pu être évalué (*figure 4*). Il ressort que de nombreuses fonctions chimiques sont préservées (esters, nitriles, halogènes, hétérocycles…). Plus important encore, le réarrangement peut être réalisé sur des molécules complexes au potentiel bioactif avéré, telles que la loratadine ou le bisacodyl, donnant ainsi de nouveaux analogues. Même si, dans la majorité des cas, le rendement isolé avoisine les 50 %, la plupart des substrats formés seraient impossibles à synthétiser par des méthodes conventionnelles.

Diverses transformations peuvent être réalisées sur les 1,2-diazépines obtenues. Par exemple, des nucléophiles carbonés ou azotés substituent le groupe éthoxy. Les couplages pallado-catalysés sont également permis, comme en témoigne le produit biaryle obtenu par couplage de Suzuki-Miyaura avec un très bon rendement. Ces exemples démontrent l'intérêt synthétique des 1,2-diazépines qui peuvent s'inscrire dans une séquence réactionnelle multi-étapes (*figure 5A*).

De manière purement fortuite, il a été montré qu'en présence de traces d'acide de Brønsted, comme de l'acide chlorhydrique résultant de l'hydrolyse de chlorure de triméthylsilyle (ou TMSCl), les 1,2-diazépines étaient intégralement consommées dans le milieu réactionnel. Parmi les produits identifiés, le dérivé pyrazole a pu être isolé. Ce dernier résulte d'une réaction de contraction de cycle dont la force motrice est la réaromatisation de l'hétérocycle. Il est à noter que cette transformation s'accompagne d'une part significative de produits de décomposition non identifiés, ce qui se traduit par des rendements modestes pour les produits isolés. Si l'intérêt synthétique de convertir des cycles pyridines en pyrazoles de manière si peu efficace est discutable, cette réaction permet néanmoins de préparer le cycle pyrazole trideutéré, auparavant inaccessible, à partir de la pyridine deutérée (*figure 5B*).

Cette sensibilité aux acides nous a fait réaliser que le protocole que nous avions décrit comportait quelques limites. En effet, les réactifs utilisés pour former les ylures de 1-aminopyridinium sont essentiellement des composés chlorés, hydrolytiquement instables, et responsables de la génération de HCl dans le milieu lorsqu'ils réagissent avec le sel de 1-aminopyridinium. Cela permet d'expliquer que la plupart des rendements isolés avoisinent les 50 % ; une partie du milieu réactionnel peut être sujette aux dégradations. Afin de limiter ces réactions secondaires, il a été nécessaire de développer une activation alternative ne générant pas de HCl. C'est dans ce contexte que les dérivés isocyanates ont été considérés. Stables, facilement préparés à partir de divers précurseurs ou commercialement disponibles, ils réagissent efficacement avec des nucléophiles azotés pour former les urées correspondantes.

Les premiers essais ont rapidement été concluants avec un excellent rendement de 88 % pour la 1,2-diazépine résultant de la réaction entre l'iodure de 1-aminopyridinium et du phénylisocyanate (PhNCO) en présence de triéthylamine sous irradiation photochimique à 365 nm (*figure 6*). Il est à noter que tous ces produits sont commercialement disponibles et accessibles en larges quantités.

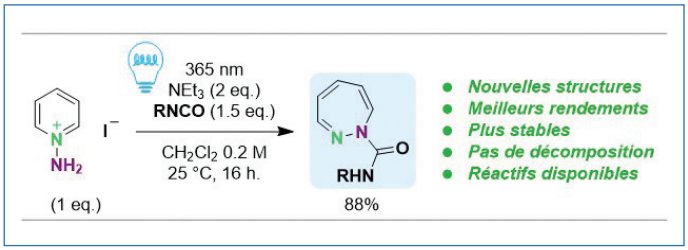


Figure 6 - L'alternative des isocyanates comme groupement activant.

En revanche, cette approche ne peut être transposée aux analogues isothiocyanates ; en effet, la charge négative de l'ylure intermédiaire n'est alors plus localisée sur l'atome d'azote, mais sur l'atome de soufre. Cette théorie a pu être validée en présence d'un électrophile, le 2-bromoacétate d'éthyle, en présence de base. Ainsi, la *S*-alkylation a été observée, conduisant après deux déprotonations successives suivie d'une extrusion de l'atome de soufre, puis de la réaromatisation du cycle, à la pyrazolo[1,5-*a*]pyridine (*figure 7*).

L'étude du champ d'application de cette voie alternative a été réalisée en variant la nature du réactif isocyanate commercial engagé. La plupart des espèces obtenues ont été isolées avec d'excellents rendements, que ce soit en série aromatique ou aliphatique. À noter que cette stratégie peut être conduite à l'échelle du gramme sans poser de difficulté.

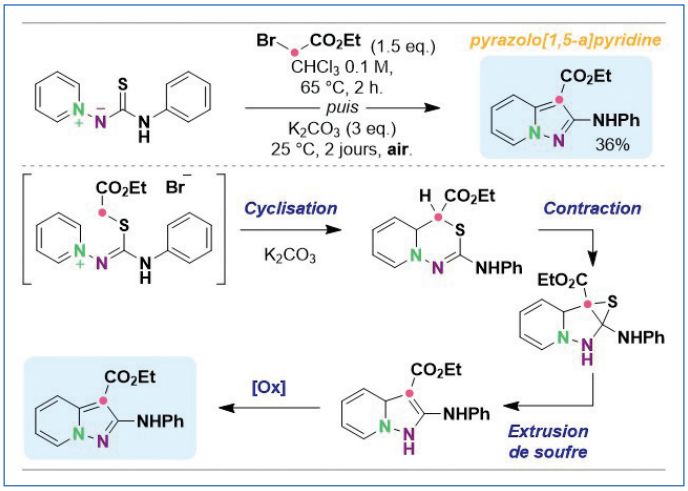


Figure 7 - Synthèse de la pyrazolo[1,5-*a*]pyridine.

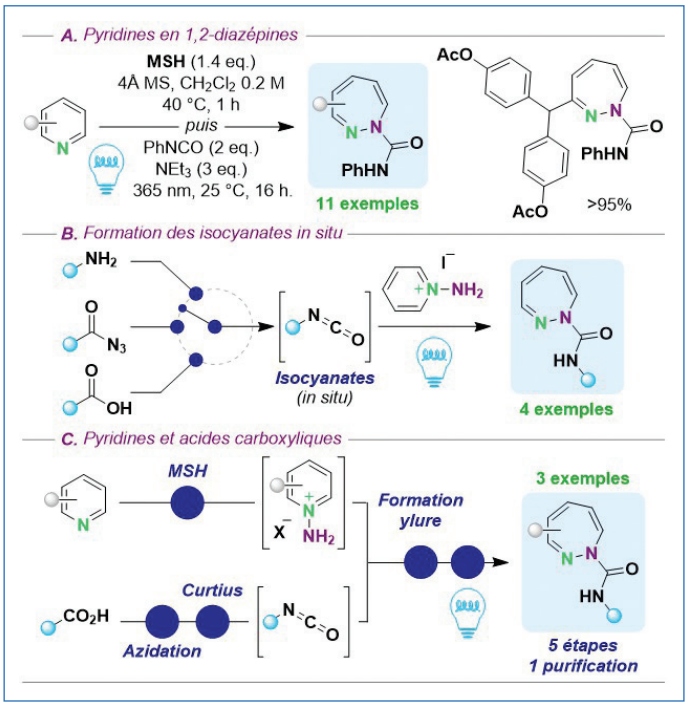


Figure 8 - Protocoles multi-étapes de préparation de 1,2-diazépines à partir de ressources abondantes.

Quelques limites demeurent cependant. En effet, une fois encore, les composés nitrés ne permettent pas l'obtention de la diazépine correspondante. De même, des substituants très riches en électrons en *para* du système aromatique semblent inhiber le réarrangement.

Cette méthodologie est également applicable à des pyridines diversement substituées après une réaction d'amination préalable en présence de MSH. La diazépine obtenue à partir du bisacodyl, isolée avec un rendement quantitatif, illustre parfaitement l'amélioration du protocole précédemment décrit (*figure 8A*).

Plus intéressant encore, les isocyanates peuvent être facilement préparés *in situ* à partir d'azoture d'acyles, d'anilines ou encore d'acides carboxyliques. En tirant avantage de ces possibilités, la robustesse du protocole a pu être démontrée et s'avère être totalement compatible avec ces conditions à travers trois séquences monotopes (*figure 8B*). Il est possible d'augmenter la complexité du système en synthétisant trois dérivés 1,2-diazépines directement à partir de pyridines et d'acides carboxyliques sans purification intermédiaire. Ainsi,

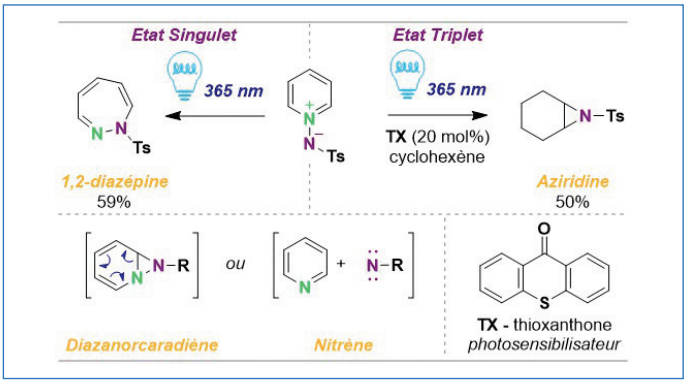


Figure 9 - Mécanisme proposé du réarrangement photochimique.

ce nouveau protocole s'avère être très pratique pour préparer très simplement et rapidement des molécules complexes portant un noyau 1,2-diazépine (*figure 8C*).

Concernant le mécanisme du réarrangement lui-même, des hypothèses avaient déjà été formulées il y a plus de 50 ans. Grâce à la détermination d'un effet cinétique isotopique inverse de second ordre, il a été possible de prouver la nature de l'intermédiaire diazanorcaradiène dont la nature demeurait spéculative (*figure 9*). De même, les ylures de 1-aminopyridinium se comportent différemment selon qu'ils se trouvent dans un état excité singulet (irradiation directe) ou triplet (transfert d'énergie avec un photosensibilisateur). Si le premier conduit à la formation de la 1,2-diazépine espérée, l'état triplet est responsable d'une rupture homolytique de la liaison *N–N* générant un intermédiaire nitrène dans le milieu. Ce dernier a pu être piégé par une oléfine simple, donnant lieu à l'aziridine correspondante.

En conclusion, ces travaux ont permis l'émergence d'un protocole photochimique robuste pour convertir efficacement et rapidement des pyridines substituées en 1,2-diazépines par insertion désaromatisante d'atome d'azote. Le verrou synthétique que représentait la synthèse de ces hétérocycles est désormais levé.

À présent, des efforts devront être investis dans l'étude de la réactivité de cette plateforme synthétique afin d'accroître la complexité moléculaire des 1,2-diazépines, et d'accéder à des espaces chimiques encore insondés.

[1] A. Gomtsyan, *Chem. Heterocycl. Compd.*, **2012**, *48*, p. 7-10, https://doi.org/10.1007/s10593-012-0960-z
[2] A. P. Taylor *et al.*, *Org. Biomol. Chem.*, **2016**, *14*, p. 6611-37, https://doi.org/10.1039/C60B00936K
[3] www.fda.gov/drugs/novel-drug-approvals-fda/novel-drug-approvals-2025 (consulté le 07/01/2026).
[4] F. Lovering, J. Bikker, C. Humblet, *J. Med. Chem.*, **2009**, *52*, p. 6752-56, https://doi.org/10.1021/jm901241e
[5] T. J. Ritchie, S. J. F. Macdonald, *Drug Discov. Today*, **2009**, *14*, p. 1011-20, https://doi.org/10.1016/j.drudis.2009.07.014
[6] M. Ishikawa, Y. Hashimoto, *J. Med. Chem.*, **2011**, *54*, p. 1539-54, https://doi.org/10.1021/jm101356p
[7] A. Krzyzanowski, A. Pahl, M. Grigalunas, H. Waldmann, *J. Med. Chem.*, **2023**, *66*, p. 12739-50, https://doi.org/10.1021/acs.jmedchem.3c00689
[8] T. P. Meagher, R. Murugan, *Comprehensive Heterocyclic Chemistry III*, A. R. Katritzky, C. A. Ramsden, E. F. V. Scriven, R. J. K. Taylor (eds), Elsevier, Oxford, **2008**.
[9] E. Boudry, F. Bourdreux, J. Marrot, X. Moreau, C. Ghiazza, *J. Am. Chem. Soc.*, **2024**, *146*, 2845-2854, https://doi.org/10.1021/jacs.3c14467
[10] X. Moreau, C. Ghiazza, *Synthesis*, **2024**, *56*, p. 3119-30, https://doi.org/10.1055/a-2335-8799
[11] C. Ghiazza, A. Damond, J. Marrot, X. Moreau, *Adv. Synth. Catal.*, **2025**, *367*, e202401201, https://doi.org/10.1002/adsc.202401201
[12] J. Streith, J.-M. Cassal, *Angew. Chem. Int. Ed.*, **1968**, *7*, p. 129, https://doi.org/10.1002/anie.196801291
[13] J. Streith, J. P. Luttringer, M. Nastasi, *J. Org. Chem.*, **1971**, *36*, p. 2962-67, https://doi.org/10.1021/jo00819a012

Clément GHIAZZA, chargé de recherche au CNRS, a reçu le ***Prix Émergence Marc Julia 2025 de la division Chimie organique de la Société Chimique de France***.



Lessive, peinture à l'huile, vitrimères : le feuilleton des savons métalliques

Ianis RETAILLEAU[1-2], Diego CIARDI[2], Jean-Baptiste CHARPENTIER[1] et François TOURNILHAC[2]

[1]Université Grenoble Alpes, CEA, Liten, Campus Ines, 73375 Le Bourget du Lac.
[2]Chimie Moléculaire, Macromoléculaire, Matériaux, ESPCI Paris, Université PSL, CNRS, 10 rue Vauquelin, 75005 Paris.
✉ jean-baptiste.charpentier@cea.fr ; francois.tournilhac@espci.fr

Résumé Les carboxylates (ou « savons ») métalliques sont les protagonistes récurrents d'un feuilleton allant de la détergence en eau calcaire à la formulation de réseaux polymères dynamiques, en passant par la conservation d'objets du patrimoine. Dans ces trois domaines, ici illustrés, les carboxylates auront le bon ou le mauvais rôle et, en fonction de leur structure, un impact majeur sur les propriétés fonctionnelles : chimiques, mécaniques, optiques.

Mots-clés **Carboxylates métalliques, vitrimères, détergence, peinture, photovoltaïque.**

Abstract **Laundry, oil paint, vitrimers: the leitmotiv of metal soaps**
Metal carboxylates (or "soaps") are recurring protagonists in a *soap opera* ranging from detergency in hard water, conservation of heritage objects and formulation of dynamic polymer networks. In these three domains illustrated here, carboxylates will play either the hero or the villain, and depending on their structure have a major impact on functional properties: chemical, mechanical, optical.

Keywords **Metal carboxylates, vitrimers, detergency, paint, photovoltaics.**

https://doi.org/10.63133/scf.act-chim.2026.519.07

La chimie de formulation, comme le souligne un article la concernant [1], peut être définie de diverses manières, mais toujours comme une science tournée vers la fonction d'usage d'un système et la satisfaction d'un cahier des charges. En ce sens, elle apparaît comme la branche de la chimie la plus proche de l'expérimentation du quotidien. La différence fondamentale entre l'expérimentateur du quotidien et le physico-chimiste est que le premier perfectionne son résultat par essai et erreur, lorsque le second s'impose de formaliser les lois prédisant les conséquences de ses actions. Avec ce parallèle à l'esprit, il est moins surprenant de trouver une problématique scientifique commune entre la lessive, la palette de Salvador Dalí et un travail de thèse en physique et chimie des matériaux (*figure 1*). Souligner ce rapprochement nous permettra d'illustrer le caractère central d'un phénomène, tantôt recherché, tantôt redouté, en sciences de la matière molle : la séparation de phases.

Aux origines des « savons »

La fabrication du savon est déjà rapportée dans les écrits sumériens et babyloniens et, de fait, sa compréhension scientifique apparaît à l'aube de la chimie. En 1813, Eugène Chevreul décrit pour la première fois la structure des savons comme sels métalliques d'acides gras. En se plaçant à l'interface entre l'eau et la salissure grasse, le savon permet le décollement, puis la mise en suspension des impuretés [2] : c'est la détergence (*detergere*, « nettoyer en enlevant » [3]). En 1828, Gay-Lussac note dans son cours de chimie une distinction intéressante : la soude et la potasse (les carbonates de sodium

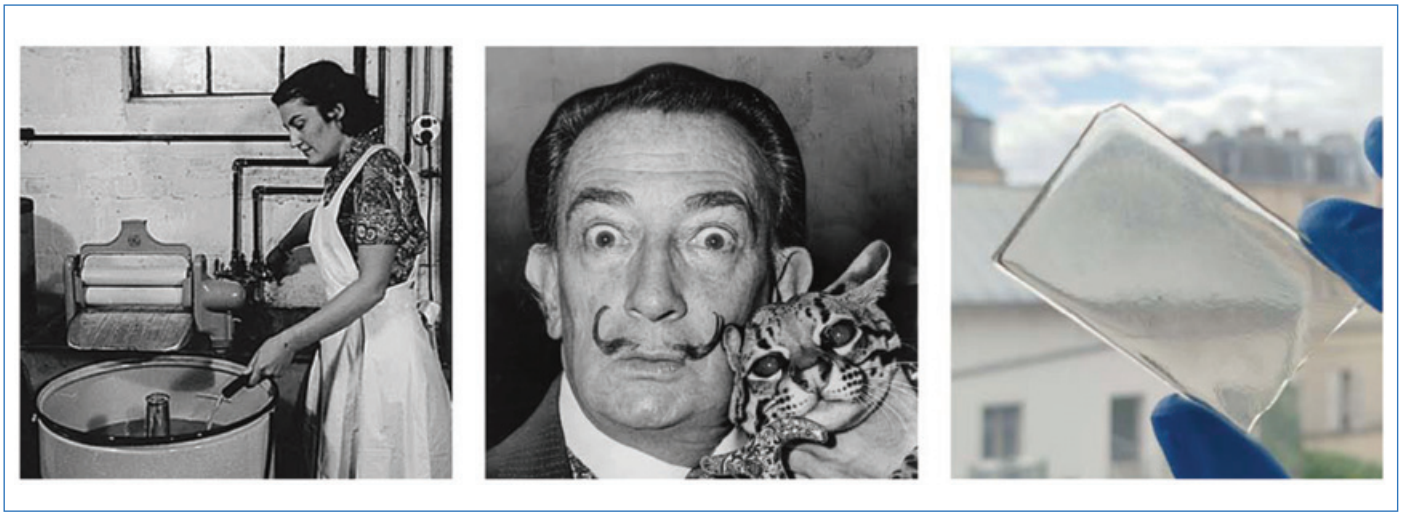


Figure 1 - Le lessiveur, le peintre et le chimiste de formulation rencontrent une même problématique : pourquoi ?

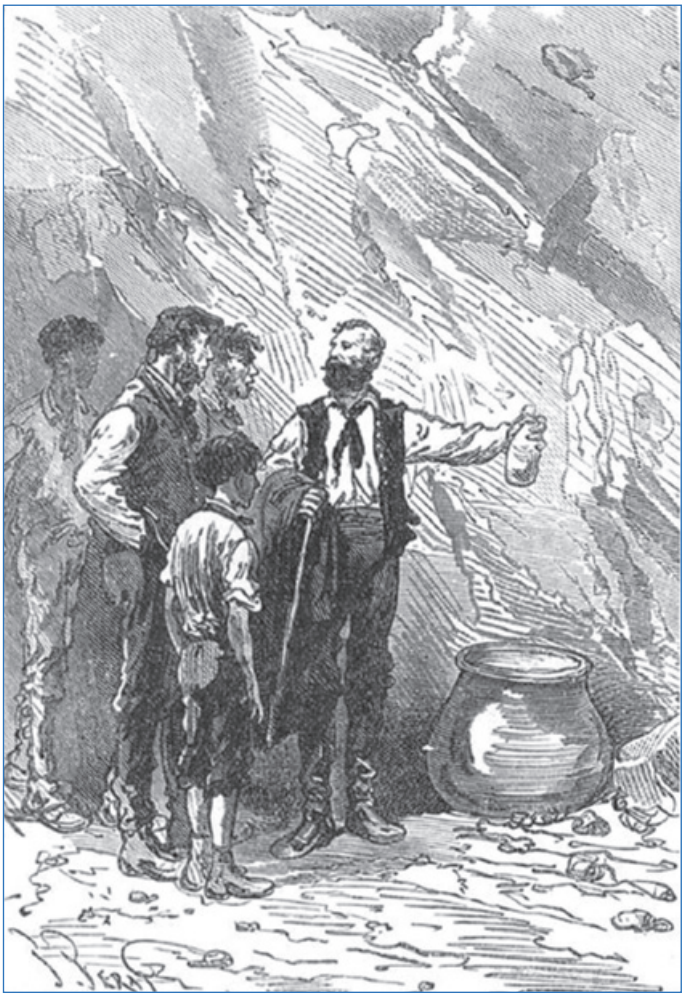


Figure 2 - Lors de ses expériences de formulation sur l'*Île Mystérieuse*, Cyrus Smith évoque de mystérieux « savons inutiles » car insolubles, préparés à base de chaux (illustration de Jules-Descartes Férat).

et de potassium sous leurs noms anciens[(a)]) forment avec les acides stéarique, margarique et oléique des sels « *qui se décomposent dans l'eau*. » En contraste, il note que « *les sels formés par ces acides avec la baryte, la strontiane, la chaux et tous les oxydes métalliques sont insolubles* » [4] (40 ans avant Mendeleïev, Gay-Lussac distingue parfaitement les alcalins, les alcalino-terreux et les éléments de transition !).

Jules Verne reprend cette distinction en 1875 comme élément d'intrigue dans l'*Île Mystérieuse*. L'ingénieur Cyrus Smith s'y emploie à recréer les produits de l'industrie de l'époque à partir des réactifs naturellement présents sur son île déserte (*figure 2*). Souhaitant fabriquer du savon pour les naufragés, il renonce à utiliser la chaux (oxyde de calcium), qui « *ne devait donner que des savons calcaires, insolubles et par conséquent inutiles*. » Il s'emploie alors à fabriquer de la soude par combustion de plantes marines, qui « *fournirait, au contraire, un savon soluble, qui trouverait son emploi dans les nettoyages domestiques* » [5].

Cette distinction entre savons *utiles* et *inutiles* est bien illustrée au quotidien lorsque la lessive est faite en eau dure – c'est-à-dire chargée en « calcaire », ou plus exactement en ions calcium. Le stéarate de sodium, principal carboxylate métallique composant le savon, subit un échange d'ions et devient stéarate de calcium, un des « sels insolubles » de Gay-Lussac. On détecte vite sa présence à la formation de résidus blancs sur les vêtements et dans la lessiveuse. Ces impuretés cristallines se glissent entre les mailles du linge, qui perd alors de sa souplesse et devient rêche et irritant pour la peau. Le désagrément ne s'arrête pas là puisque la lessive perd de son efficacité. En effet, les stéarates immobilisés dans le résidu cristallin ne sont plus disponibles pour jouer leur rôle de détergent. En français, le stéarate de calcium n'a pas de nom vernaculaire ; les anglophones le nomment « *soap scum* » – *scum* ayant l'à-propos de se traduire par « *écume* » ou par « *ordure* », ce qui illustre bien son caractère indésirable dans le linge.

Dans le premier épisode du *feuilleton des carboxylates* [6], apparaissent donc le « bon » et le « mauvais » savon, le premier indispensable à la détergence, le second ennemi ultime du linge. Reste la question : à quelle différence fondamentale tient cet écart de solubilité ? La réponse semble résider dans la nature de l'ion impliqué. En effet, on observe cette même différence de solubilité entre carboxylates d'alcalins (potassium) et carboxylates d'alcalino-terreux (magnésium). On peut penser à plusieurs effets, mais le plus évident est que les stéarates d'ions 2+ impliquent une double quantité d'acide gras pour être neutres. Ceci les rend plus hydrophobes et réduit donc leur solubilité dans l'eau (le bilan enthalpique et entropique exact est, au demeurant, très complexe).

Il est intéressant de noter que, contre intuitivement, le stéarate de sodium a un point de fusion plus élevé (278-290 °C) que le stéarate de calcium (140-160 °C) alors qu'il se dissout mieux. Un cristal de carboxylate gras est en effet à la fois un solide ionique (liaisons métal-ligand) et un solide moléculaire (liaisons de van der Waals entre chaînes alkyles). Dans le stéarate de sodium, les interactions ioniques dominent (la différence d'électronégativité entre les atomes d'oxygène du carboxylate et le métal est plus importante pour le sodium que pour le calcium), ce qui est favorable à la solubilité dans l'eau, mais donne au solide un point de fusion élevé, à l'image d'un sel (NaCl fond vers 800 °C).

Après avoir comparé les stéarates en fonction du métal qu'ils complexent, on peut s'interroger sur l'impact de la structure d'un acide carboxylique autre que l'acide stéarique. Un indice réside dans les remèdes trouvés au problème des *soap scums*. Les recettes de grand-mère telles que l'ajout de jus de citron (acide citrique), parfois accompagné de bicarbonate de soude, lors du rinçage visent à redissoudre le résidu après coup et non à en empêcher la formation. C'est dans les solutions industrielles qu'on trouve une idée inspirante : ajouter à la lessive un bon ligand de l'ion calcium, afin de l'investir à l'état de complexe monométallique et l'empêcher de former des structures insolubles. Les ligands en question sont souvent d'autres acides carboxyliques. Certains sont des petites molécules, comme l'acide édétique (éthylènediaminetétraacétique, EDTA), qui sous forme édétate crée six liaisons spécifiques avec Ca^{2+} et entoure complètement l'ion formant un complexe octaédrique ; d'autres sont des copolymères polycarboxyliques (maléique, acrylique), qui jouent le même rôle. On y ajoute des agents alcalinisants afin de favoriser la formation des carboxylates désirés. On trouve également dans les lessives industrielles des polyphosphates ou des zéolithes capables de séquestrer spécifiquement le calcium [2].

On le voit, il existe un arsenal de solutions, et on pourrait penser que le défi scientifique s'arrête là. Pourtant, une nouvelle saison du feuilleton s'ouvre, au début des années 2000, dans un domaine qui semble bien éloigné de la détergence : la conservation du patrimoine. D'abord, il nous faut revenir quelque cent ans en arrière pour retracer une autre histoire, celle des pigments blancs en peinture à l'huile.

Dans la peinture à l'huile, des savons à l'échelle du siècle

Dans ses *50 secrets magiques*, Salvador Dalí entend « *rendre translucides les plus obscurs secrets techniques* » [7]. Il disserte longuement sur les couleurs d'un point de vue esthétique, mais aussi sur les pigments sous l'angle scientifique. Il constate d'ailleurs : « *Si, étant peintre, vous êtes aussi grand chimiste, cela ne vous fera pas de mal.* » Parmi les couleurs, le blanc est au sommet de la hiérarchie dalinienne. Le plus élevé des pigments de la palette serait le blanc d'argent, « *Jupiter des couleurs* ». Ce nom désigne selon ses propres termes « *le carbonate de plomb pur, obtenu par procédé humide, en précipitant un sel de plomb dans de l'acide carbonique* » (Dalí parle sûrement du CO_2 aqueux). Également nommé céruse ou blanc de Saturne, c'est un pigment très ancien [8] et ce sera, selon Charles-Ernest Guignet, l'unique pigment blanc utilisé en peinture à l'huile jusqu'au XVIII^{e} siècle. En 1781, Courtois et Guyton de Morveau lui inventent un concurrent : le blanc de zinc (oxyde de zinc) [9].

La concurrence entre les deux blancs divise chimistes et artistes peintres. Guignet écrit en 1889 dans *Les Couleurs* : « *Le blanc de zinc est* […] *aussi blanc que la plus belle céruse ; de plus, il n'est pas vénéneux* » [10]. La toxicité du plomb est connue depuis l'Antiquité, mais il faudra attendre 1915 et que le saturnisme soit une maladie professionnelle répandue chez les ouvriers peintres pour voir, en France, son utilisation inderdite dans le bâtiment. Guignet poursuit : « *Quant à la peinture d'art, les artistes devraient renoncer complètement à la céruse et la remplacer par le blanc de zinc.* » Les artistes sont rarement de son avis ; Dalí utilise les deux pigments (*figure 3*), et note leurs différences : « *votre blanc d'argent est tiède et votre blanc de zinc glacial.* » Cette différence bien connue est due, non pas à une différence d'indice de réfraction comme on pourrait le penser ($n \approx 2{,}0 \pm 0{,}1$ dans les deux cas), mais à une différence de taille des particules : la préparation d'oxyde de zinc tend à former de petits cristaux facilement dispersibles dans l'huile, au point que certaines particules n'atteignent pas la taille nécessaire pour diffuser la lumière ; il existe même des « blancs » de zinc transparents. À l'inverse, la précipitation de carbonate de plomb forme de plus grosses particules, qui de plus tendent à s'agréger dans l'huile. Dalí tire parfois avantage de la couvrance du plomb et de la brillance du zinc en même temps : il recommande un glacis de blanc de zinc sur le blanc d'argent pour obtenir « *une pureté de ton absolue* ».

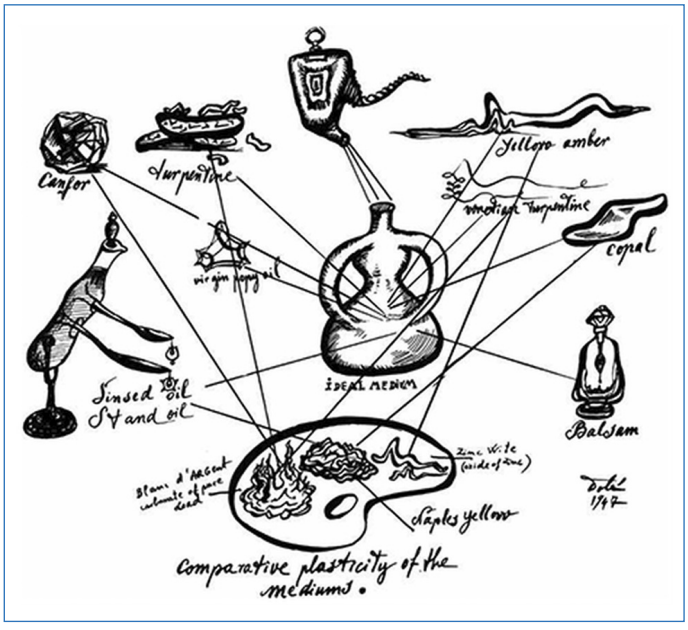


Figure 3 - « *Plasticité comparative des médiums* » : ce schéma surréaliste de Dalí montre le caractère central des blancs de plomb et de zinc sur sa palette (tiré de [5], © Salvador Dalí, Fundació Gala-Salvador Dalí / Adagp, Paris 2026).

Dans la peinture, l'interaction entre pigment et liant (en l'occurrence l'huile) impacte les propriétés de court terme de la peinture : texture, siccativité, propriétés mécaniques du film de peinture sec et, bien sûr, aspect visuel. Les interactions sur le temps long sont plus difficiles à prévoir. Cela ressort des écrits de Dalí qui commente la stabilité chimique du pigment lui-même – il note par exemple la résistance de l'oxyde de zinc qui « *ne noircit pas au contact des fumées de soufre* », contrairement au carbonate de plomb –, mais qui n'évoque pas la stabilité à long terme du pigment dans l'huile. Et pour cause, c'est seulement au début des années 2000, et dans tous les pays, que les conservateurs s'émeuvent d'une épidémie touchant les tableaux des grands maîtres des XIX^{e} et XX^{e} siècles : des savons de plomb et de zinc, qui détériorent gravement les œuvres [11]. Comment expliquer leur présence ?

Les huiles végétales, dites « siccatives », utilisées en peinture sont principalement composées de triglycérides, une molécule de glycérol dont les trois fonctions alcool sont estérifiées par des acides gras saturés (palmitique) et insaturés (oléique, linoléique et linolénique). La siccativation, réaction chimique de réticulation (c'est-à-dire de formation d'un réseau) de la peinture consiste en l'autoxydation des triglycérides : l'oxygène de l'air réagit avec les insaturations pour créer des groupes hydroperoxyde (-O-O-H), qui en libérant de l'eau forment des ponts éther-oxyde (*figure 4a*). Or, c'est précisément la famille des triglycérides qui fournit l'ingrédient de base de la fabrication des savons : les graisses sont dites « saponifiées » dès lors qu'on a hydrolysé leurs liaisons ester en milieu basique. Comment ce processus peut-il survenir dans un film de peinture solide ?

Il se produit en deux temps : une partie des liaisons ester du réseau s'hydrolyse spontanément, au contact de l'humidité ambiante ou de l'eau dégagée par l'autoxydation. Les esters branchés au réseau par un pont éther-oxyde (*figure 4b*, gauche) s'hydrolysent en acides eux aussi branchés au réseau polymère du liant. En revanche, les esters à longue chaîne saturée (palmitate), non oxydables, s'hydrolysent en acides gras déconnectés du réseau (*figure 4b*, droite) [11]. Ces acides migrent à travers la couche de peinture, et aboutissent préférentiellement en surface des pigments [12]. Les pigments, étant partiellement solubles dans le milieu, libèrent des ions métalliques, de plomb et zinc [11]. La rencontre avec les ligands carboxylates libres laisse prévoir la suite du feuilleton.

Pour commencer, ce carboxylate métallique libre (*figure 4b*, milieu) est un catalyseur d'hydrolyse : il accélère la réaction responsable de sa propre formation (on parle d'autocatalyse). Ensuite, puisqu'il est libre, il peut quitter le pigment et migrer jusqu'à l'intérieur du liant où il rencontrera les fonctions acide liées au réseau. Par échange de ligand, un réseau ionomère se forme (*figure 4c*, gauche) [13]. Cela ne se fait pas au détriment du film de peinture, mais tend au contraire à le stabiliser [14]. Cependant, lorsque le réseau est saturé en zinc, un autre phénomène prend place à l'échelle de plusieurs années : les carboxylates de zinc à chaîne saturée se concentrent dans leur lieu de formation où ils finissent par cristalliser (*figure 4c*, droite). Cette cristallisation (pour plusieurs raisons qu'il serait

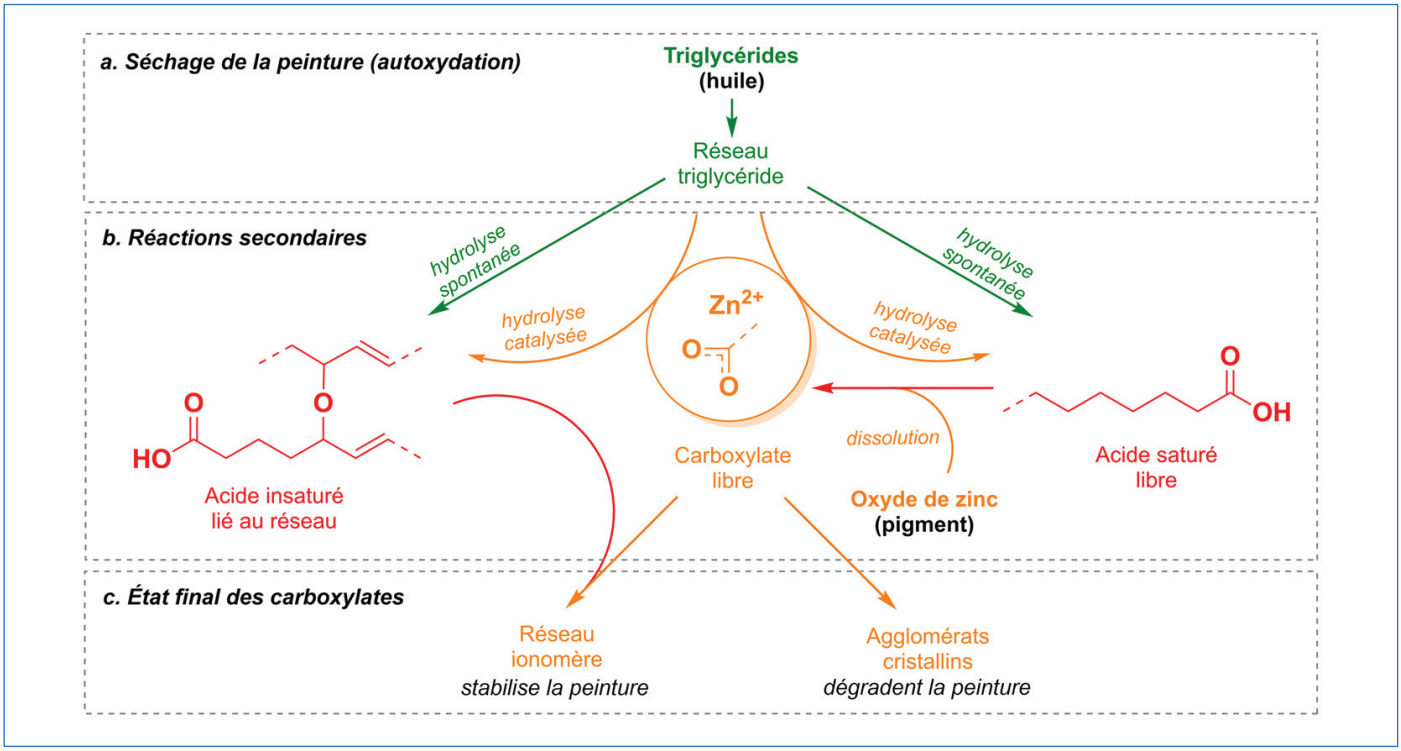


Figure 4 - (a) Après séchage de la peinture, une partie des esters du réseau est hydrolysée spontanément (flèches vertes). (b) La formation d'acides saturés libres (molécule rouge à droite) est critique car elle cause la formation d'un carboxylate libre qui devient catalyseur d'hydrolyse. (c) Ce carboxylate libre forme ou bien un réseau ionomère au contact d'acides insaturés liés au réseau, ou bien des agglomérats cristallins par accumulation.

long d'expliquer) est elle-même auto-catalysée – pas assez pour que Dalí ait eu le temps de s'en rendre compte, mais gravement à l'échelle du siècle.

Ces savons cristallins sont responsables de tous les maux envisageables dans la peinture blanche : formation d'efflorescences (protubérances visibles à l'œil nu), de zones rigides et cassantes qui favorisent l'apparition de fissures, perte d'adhérence entre les couches de peinture. Comble du désastre, la blancheur de la peinture est affectée : l'oxyde, qui s'est dissous, fait défaut, et les savons formés ont un indice de réfraction ($n \approx 1{,}5$) quasiment identique à celui des huiles siccatives ; ils apparaissent donc translucides. Une fois encore, on retrouve le « bon carboxylate », idéalement non cristallisable, agissant seulement comme catalyseur et stabilisant de réseau polymère, et le « mauvais carboxylate », agrégé, cristallin et disgracieux.

Quelle solution alors à cette dégradation ? D'une certaine manière, la solution inverse à notre premier épisode : changer le métal plutôt que l'acide. Aujourd'hui, le pigment blanc dominant est le blanc de titane. Dans l'oxyde de titane TiO_2, la liaison métal-oxygène Ti–O est beaucoup plus forte (et possède un caractère plus ionique) que les liaisons Zn–O et Pb–O, ce qui le rend quasiment insoluble dans le milieu. De plus, l'indice de réfraction de l'oxyde de titane ($n \approx 2{,}7$ sous la forme rutile) est bien éloigné de celui des huiles ($n \approx 1{,}5$), et ce contraste donne aux peintures à base de titane une blancheur inégalée. Charge aux artistes peintres d'aujourd'hui d'en évaluer l'intérêt esthétique, l'ouvrage de Dalí restant muet au sujet de ce pigment alors que l'artiste fut contemporain de son usage.

Il est intéressant de noter que la séparation de phase des savons métalliques est parfois un avantage, même dans l'industrie de la peinture : elle est exploitée pour son effet épaississant et émulsifiant. Même la cristallisation peut être recherchée : certains savons sont également utilisés comme agents matants, car ils forment lors du séchage un film cristallin irrégulier en surface, qui diffuse la lumière. Enfin, dans la conservation d'objets du patrimoine en métal, l'exploitation des propriétés hydrophobes (et donc anti-corrosion) des savons de plomb a été rapportée dans un autre article du journal : en faisant réagir la patine naturelle composée de carbonate à la surface d'objets en plomb avec une solution d'acides gras, on forme un film cristallin micrométrique de carboxylates de plomb qui isole la pièce sans modifier son aspect [15].

Ainsi, la physico-chimie des savons mobilise encore aujourd'hui conservateurs et restaurateurs. En parallèle, la troisième saison de notre saga débute avec une problématique encore bien différente.

Vitrimères : des savons pour le recyclage des composites ?

Lorsque le débat public aborde les problématiques liées au recyclage des polymères, il est souvent question du « plastique », c'est-à-dire des *thermoplastiques*, des matériaux dont les chaines polymères ne sont pas liées chimiquement entre elles. Cette absence de réticulation fait des thermoplastiques, du point de vue du physico-chimiste, des matériaux intrinsèquement « recyclables ». Il peuvent être dissous, fondus, remis en forme à volonté en gardant leurs propriétés initiales, ceci avec une difficulté majeure : ils doivent être purs. L'obstacle principal à la généralisation de leur recyclage, cependant, est économique : le prix de la matière première étant très bas, le recyclage est peu rentable.

C'est tout autre chose lorsqu'il est question des *thermodurcissables*, réseaux polymères réticulés chimiquement. Cette caractéristique rend leur structure tridimensionnelle permanente : ils gardent leur forme lorsqu'on les chauffe. Les thermodurdurcissables trouvent une application majeure dans

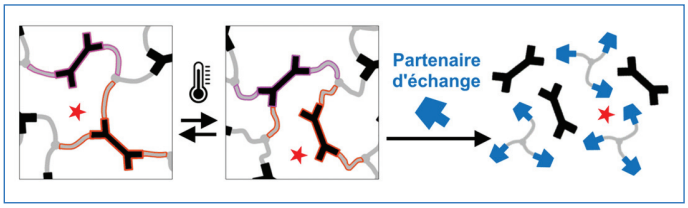


Figure 5 - Un vitrimère est capable de modifier sa topologie en température grâce aux réactions d'échanges prenant place entre les briques noires et grises du réseau, sous l'activation d'un catalyseur (étoile rouge). En présence d'une petite molécule partenaire d'échange (dit « solvant réactif », brique bleue), les réactions d'échange permettent de déconstruire le réseau.

la fabrication de composites qui tendent à remplacer le métal dans la conception d'éoliennes, de trains, de navires, d'avions, avec un objectif de gain de masse pour des propriétés mécaniques (module d'Young) identiques voire supérieures. Or, dans les composites à fibres continues, de carbone par exemple, la majorité de la valeur (60-90 %) est contenue dans le renfort, ce qui fait du recyclage des composites un enjeu à la fois écologique et économique.

Les vitrimères sont, comme les thermodurcissables, des réseaux polymères. Leur différence réside dans la capacité des points de réticulation à participer, au sein d'un matériau solide, à des réactions chimiques d'échange. Cette capacité cause une redistribution des nœuds du réseau sous l'action d'un stimulus (contrainte mécanique, température, rayonnement). Ceci leur confère diverses propriétés : remise en forme, auto-réparation, auto-adhésion, mais également solvolyse (*figure 5*), c'est-à-dire déconstruction du réseau en présence d'une petite molécule capable de prendre part à la réaction d'échange. Dans toutes ces propriétés, on perçoit un important potentiel d'application à la déconstruction d'objets composites, de l'échelle moléculaire à l'échelle système, et au recyclage éventuel de leurs constituants.

La réaction chimique exemplifiée dans les premiers vitrimères fut la transestérification [16]. Beaucoup de thermodurcissables de l'industrie des composites sont des vinyl esters ou des polyesters issus de réactions entre monomères époxy et comonomères anhydrides ou acides carboxyliques : ils sont donc théoriquement capables de réactions d'échange. En réalité, la réaction de transestérification est lente (sur la gamme de température accessible sans dégradation du matériau). La réaction étant largement étudiée pour d'autres usages, les catalyseurs ne manquent pas : organiques (guanidines, phosphines...), mais aussi métalliques, particulièrement par des composés à base de zinc qui sont robustes à température élevée [17]. Dans le cas des réseaux à base époxy, il a été montré que les durcisseurs acide carboxylique produisaient adéquatement des fonctions hydroxyle capables d'accélérer la réaction de transestérification en synergie avec le zinc [18]. D'autre part, contrairement à la réaction époxy + anhydride qui est autocatalysée, la réaction époxy + acide est beaucoup mieux contrôlée, ce qui en fait un choix possible pour certaines méthodes de mise en œuvre, notamment les préimprégnés [19].

Les carboxylates métalliques font donc leur retour. Lorsqu'il a fallu adapter des formulations vitrimères pour des préimprégnés, la question de la cristallinité des savons est survenue. En effet, les prototypes ayant servi à démontrer le concept vitrimère furent préparés à partir de diacides ramifiés non cristallisables (*figure 6a*). En présence d'un sel de zinc, ces acides forment des savons eux-mêmes amorphes ou de point de

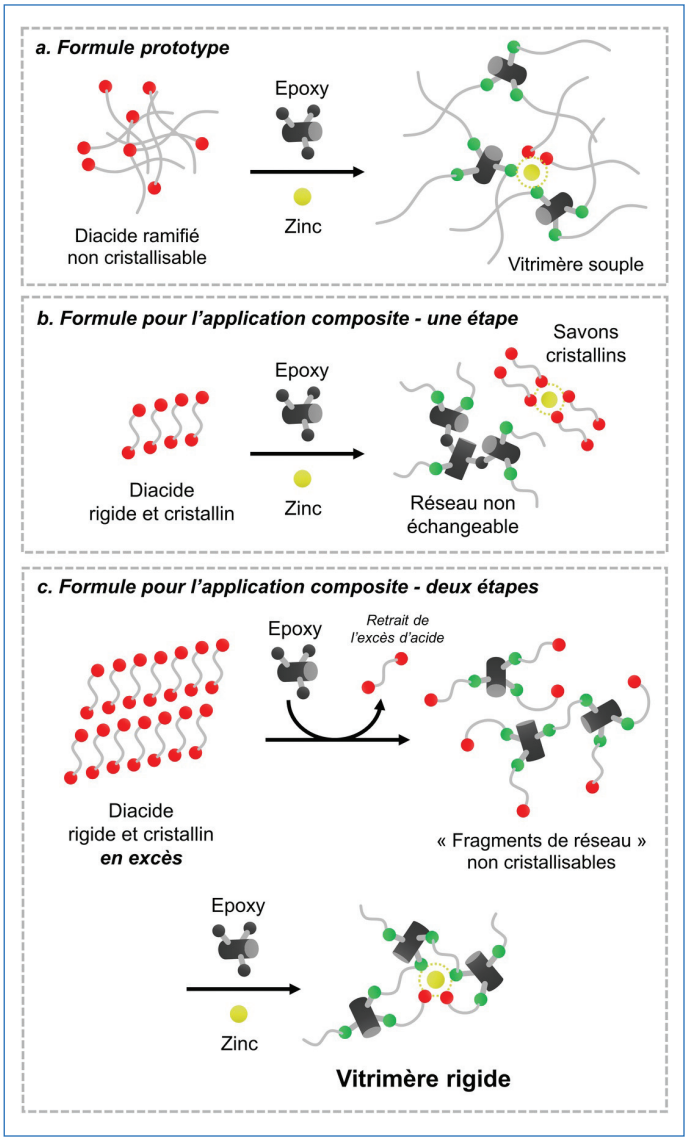


Figure 6 - (a) Un diacide ramifié et non cristallisable formulé en présence d'époxy et de zinc donne un réseau vitrimère souple à température ambiante, non adapté à la fabrication de composites. (b) En formulant de la même façon un diacide rigide et cristallin, on perd les propriétés vitrimères en raison de la précipitation du zinc. (c) Une formule en deux étapes permet d'obtenir cette fois-ci un vitrimère rigide.

fusion proche de l'ambiante. Ils étaient donc à l'état fondu aux températures typiques de réaction (120-180 °C). Malheureusement, avec une transition vitreuse proche de l'ambiante, ces prototypes sont à la fois trop rigides pour être des élastomères et trop souples pour faire des matrices de composites. Pour former des réseaux rigides adaptés à l'application composite, il a fallu se tourner vers des diacides à chaîne courte non ramifiée, qui ont tendance à cristalliser beaucoup plus que les précédents. En appliquant le même protocole de préparation que précédemment (*figure 6b*), la précipitation rapide de savons cristallins insolubles et à haut point de fusion (plus de 300 °C) est survenue, perturbant la stœchiométrie et rendant le zinc indisponible pour participer à la catalyse. Il se forme alors un réseau hétérogène et non-vitrimère.

On pourrait penser que c'est une fatalité au regard des réactifs. Pourtant, l'exemple de la peinture nous rappelle qu'il existe des savons de zinc non cristallisables à la condition que la fonction acyle soit portée par un squelette aléatoirement ramifié. Justement, même si les acides dicarboxyliques utilisés sont non ramifiés, le réseau polymère que l'on vise est par excellence un polymère ramifié. L'angle d'attaque que nous

Quelques techniques de caractérisation

- Relaxation des contraintes

On impose à un échantillon rectangulaire une torsion d'angle donné, à température contrôlée, ce qui correspond à une *déformation* constante. Le rhéomètre mesure alors la *contrainte*, c'est-à-dire la force exercée par l'échantillon en réponse à cette déformation. Dans le cas d'un thermodurcissable classique, cette contrainte demeure constante au cours du temps. Pour un vitrimère, les réactions d'échange dynamiques réorganisent progressivement la topologie du réseau afin de l'adapter à la déformation imposée : la contrainte décroît alors jusqu'à s'annuler, tandis que l'échantillon adopte une nouvelle forme d'équilibre.

- Analyse mécanique dynamique (DMA)

Un échantillon rectangulaire est soumis à une *sollicitation oscillatoire* – en contrainte ou en déformation – tout en appliquant une *rampe de température contrôlée*. Le rhéomètre mesure les modules viscoélastiques ainsi que le *facteur d'amortissement*, qui quantifie la capacité du matériau à dissiper l'énergie mécanique reçue. Pour un thermodurcissable comme pour un vitrimère, cette dissipation atteint un maximum au voisinage de la transition vitreuse (T_g), traduisant le passage de l'état vitreux rigide à l'état caoutchoutique plus mobile. Plus T_g est élevée, plus le matériau conserve ses propriétés mécaniques sur une large plage de températures d'utilisation, ce qui témoigne d'une meilleure stabilité thermique et dimensionnelle.

- Diffractométrie des rayons X (DRX) et diffusion des rayons X aux petits angles (SAXS)

L'échantillon, préalablement réduit en poudre, est exposé à un *faisceau de rayons X*. Le rayonnement incident est diffusé, c'est-à-dire dévié dans différentes directions. *L'angle de diffusion* dépend de la taille des hétérogénéités structurales : plus les objets diffusants sont petits, plus la diffusion se produit à grands angles. Lorsque l'échantillon présente une structure cristalline, les plans du réseau cristallin diffractent le rayonnement à de grands angles. Les interférences constructives associées donnent lieu à des pics caractéristiques permettant d'identifier précisément la phase cristalline. Des objets de plus grande taille (10 à 100 nm) diffusent le rayonnement à plus petits angles (environ 0,001 à 0,1°) et se révèlent par la présence d'un épaulement ou d'un maximum large sur la courbe d'intensité, dont la position est directement liée à leur taille moyenne.

avons choisi est donc d'introduire les ramifications avant d'introduire le zinc [6].

Pour ceci, nous procédons en deux étapes : d'abord, faire réagir la résine époxy avec un excès d'acide dicarboxylique, excès suffisant pour éviter la réticulation prématurée et dont on se débarrasse après réaction (*figure 6c*). On obtient un prépolymère ramifié à terminaisons acide carboxylique. Ce prépolymère est structurellement formé de fragments du réseau cible mais encore largement déconnectés. Macroscopiquement, c'est encore un liquide visqueux. Lorsqu'on y ajoute le zinc, on constate aussitôt la présence de savons par spectroscopie infrarouge, mais sans qu'il y ait précipitation ! Le prépolymère réactif ainsi catalysé est prêt à réagir avec une deuxième ration de résine, rajoutée en quantité *ad hoc* pour rétablir la stœchiométrie.

Sur la *figure 7*, nous comparons les propriétés du réseau ainsi obtenu à un réseau de référence – de même formule brute –, mais obtenu sans prendre ces précautions. On y voit des mesures de relaxation de contrainte $\tau_t / \tau_{t=0}$ en fonction du temps ; la diminution de τ à déformation constante indique la capacité d'écoulement. Les deux réseaux testés

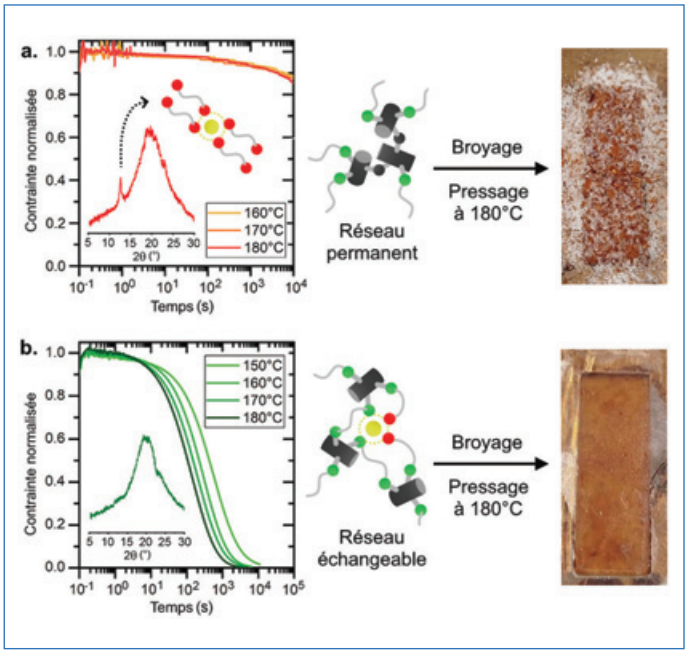


Figure 7 - (a) Le réseau formulé en une étape (*figure 6b*) analysé en DRX montre un pic correspondant aux savons de zinc cristallins. Leur présence est corrélée à l'absence de relaxation thermoactivée (la contrainte reste quasi-constante), ce qui pointe vers la formation d'un réseau permanent, impossible à remettre en forme par broyage/pressage. (b) Le réseau formulé en deux étapes ne présente qu'une large bande amorphe en DRX, et est capable de relaxation thermoactivée (la contrainte revient à zéro, d'autant plus rapidement que la température est élevée), caractéristique d'un vitrimère. Après broyage/pressage, le matériau retrouve sa forme d'origine.

sont chimiquement réticulés (on s'en est assuré par des tests d'insolubilité). Dans le réseau de référence (*figure 7a*), comme attendu pour un réseau chimiquement réticulé, la contrainte ne revient pas à zéro, preuve que les réactions d'échange sont inopérantes. La diffractométrie des rayons X (DRX) en insert montre que le zinc est piégé à l'état de savons cristallins. Sur la *figure 7b*, on constate au contraire, dans le réseau formé en deux étapes, l'absence de signaux cristallins et corrélativement l'effet catalytique du zinc : les contraintes ont tendance à s'annuler et ce, d'autant plus rapidement que la température est plus élevée, preuve de réactions d'échange thermoactivées. Les photos jointes montrent une conséquence pratique des réactions d'échange : il est possible de reformer un vitrimère à partir de fragments en exerçant une pression à température suffisamment élevée, alors que cela est impossible pour le réseau permanent.

La diffusion des rayons X aux petits angles (SAXS) sur la *figure 8a* permet d'accéder à la taille caractéristique des objets formés en présence de zinc. Le réseau permanent (courbe rouge) présente des agrégats de 160 Å environ, ce qui correspond à un agrégat cristallin portant plusieurs centaines d'atomes de zinc. C'est l'homologue de la protubérance dans la peinture blanche. Le vitrimère (courbe verte) présente un épaulement vers 20 Å, identifiable comme un complexe métallique portant seulement quelques atomes de zinc. On peut dire que le zinc est dispersé à l'échelle moléculaire, comme dans le réseau ionomère de la peinture blanche. L'analyse mécanique dynamique (DMA) du réseau en *figure 8b* montre l'impact des savons sur les propriétés mécaniques des réseaux formés. Le réseau permanent (courbe rouge) apparait inhomogène : les deux pics (vers 90 et 120 °C) correspondent à des zones structurellement différentes, et pour cause. La distribution hétérogène du diacide, dont une partie

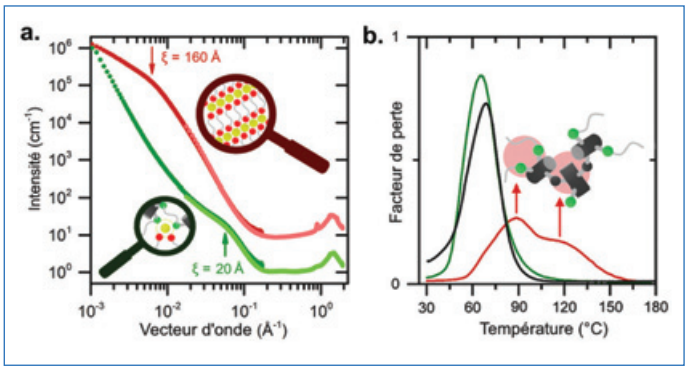


Figure 8 - (a) En SAXS, la position des épaulements sur les courbes du réseau permanent (rouge) et vitrimère (vert) est interprétée à l'aide d'un modèle mathématique comme la taille des agrégats de zinc présents dans le réseau. (b) Le réseau vitrimère (vert) a les mêmes propriétés mécaniques que le réseau en absence de zinc (noir), tandis que le réseau où le zinc est précipité (rouge) présente une séparation de phases plus souples et plus rigides, comme le montre l'apparition de deux bandes distinctes.

est piégée dans les savons cristallins, favorise tantôt des réactions d'homopolymérisation (l'époxy réagit avec lui-même), tantôt des réactions d'éthérification (l'époxy réagit avec des hydroxyles) dans certaines parties du réseau. De l'autre côté, le vitrimère formé en deux étapes (courbe verte) présente les mêmes propriétés mécaniques que le polyester non catalysé (courbe noire) et est clairement beaucoup plus homogène.

Ces trois saisons de notre feuilleton révèlent un parallèle entre la dégradation des propriétés de trois systèmes semblant ne rien avoir en commun. Propriétés chimiques d'une part : les carboxylates de calcium cristallins diminuent l'efficacité de la détergence dans la lessive ; les carboxylates de zinc, une fois cristallisés, perdent leurs propriétés catalytiques dans la peinture et dans les vitrimères. Propriétés mécaniques d'autre part : les *soap scums* rendent le linge rêche, fragilisent la peinture et introduisent des défauts rigides dans les vitrimères. La fin de cet article illustrera un autre parallèle en mentionnant le sujet de recherche qui nous préoccupe actuellement [22] et dont l'avancé a motivé cette excursion inattendue dans la physico-chimie des savons : des composites pour le photovoltaïque.

Composites vitrimères et photovoltaïque : des leçons du passé

Un coup d'œil sur les graphiques de RTE (mix énergétique en temps réel [20]) permet de constater que, même en hiver, le photovoltaïque (PV) atteint facilement 10 % de la production au milieu du premier pic de consommation diurne ; en été, il atteint 30 %. La synchronicité entre l'offre et la demande, bien qu'imparfaite, devrait convaincre d'étendre ce mode de production d'énergie renouvelable. Cependant, le gisement de surfaces disponibles pour l'intégration du PV souffre, d'une part, de l'usage concurrent des sols (avec l'usage agricole par exemple) et, d'autre part, de contraintes technologiques multiples, parmi lesquels le poids des modules. Remplacer, en face avant, le verre par des composites transparents permettrait de gagner grandement en légèreté (le verre représente environ 70 % de la masse d'un module [21]). Au regard de la recyclabilité, le physico-chimiste pourrait penser que substituer le verre par des polymères est un non-sens ; en réalité, tout dépend ce qu'on appelle recyclabilité. Si on raisonne non pas en poids mais en valeur, on s'aperçoit que le recyclage du silicium et de

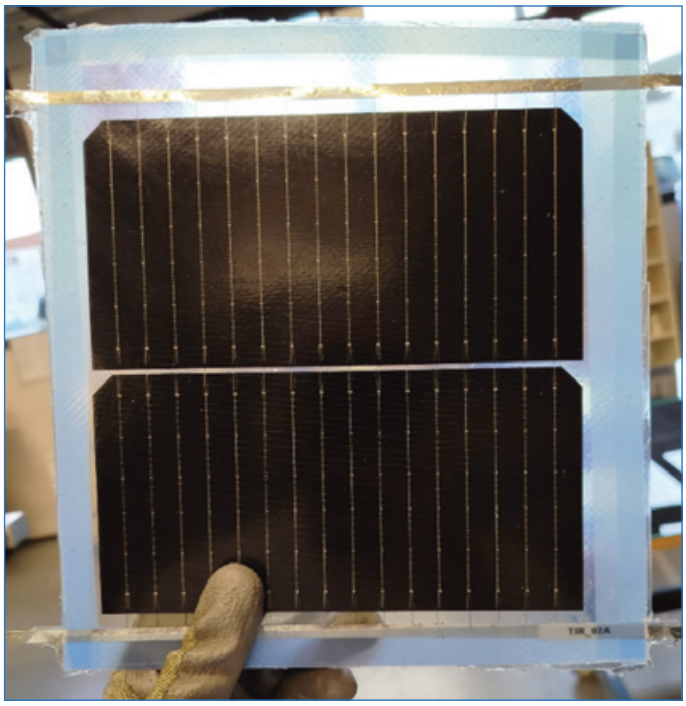


Figure 9 - Un panneau solaire léger et recyclable grâce aux savons !

l'argent restaurerait de 45 à 70 % de la valeur des matériaux employés. Dans ce contexte, le concept de face avant vitrimère apporte à la fois la légèreté et la facilité de déconstruction.
Notre objectif, dans le projet Smart4Module (qui s'inscrit dans le PEPR « Systèmes énergétiques et énergies renouvelables ») [22], est précisément de produire un tel matériau rigide, transparent et déconstructible. Pour ceci, un vitrimère seul n'a pas les propriétés mécaniques adéquates : il faut un composite. La question de l'aspect visuel, déjà rencontré dans les deux premières saisons de notre feuilleton, ressurgit sous le nom de « propriétés optiques ». Les savons cristallins qui formaient des tâches blanchâtres sur le linge et des efflorescences sur les œuvres de Salvador Dalí ne doivent pas ici entraver le passage de la lumière vers les cellules. Nos savons métalliques devront donc présenter deux caractéristiques :
- être suffisamment petits, pour ne pas dépasser la taille critique à laquelle ils diffuseraient la lumière ;
- et avoir un indice de réfraction suffisamment élevé, afin de ne pas trop diminuer l'indice de la matrice et donc affecter la cohérence entre fibre et matrice, garante de la transparence du composite.
La *figure 9* montre un prototype de module à face avant vitrimère utilisant la chimie époxy/acide présentée précédemment. Le matériau a été formulé uniquement à base de résines époxy utilisées dans l'industrie et d'acides largement disponibles commercialement, auxquels on a ajouté un catalyseur métallique. Son aspect sans défaut apparent permet de constater tout l'apport de l'étude et la compréhension des savons métalliques. Un tel module, après solvolyse, permettrait la récupération des matériaux composant les cellules, intacts et prêts à réintégrer la filière : le silicium (noir sur la photo) et ses métallisations en argent (fins fils gris verticaux et horizontaux).
Fort de deux siècles de compréhension et d'étude des savons, une nouvelle problématique scientifique est résolue. Une saison s'achève pour les savons métalliques, mais le feuilleton est sans doute loin d'être terminé, et qui sait dans quel autre domaine le prochain épisode s'ouvrira...

[a] Il est intéressant de noter que tous les composés minéraux décrits dans ce paragraphe sont non seulement toujours couramment désignés par ces noms, mais sont aussi à l'origine du nom scientifique des métaux qu'ils portent : la *soude* donne le sodium, la *potasse* le potassium, la *baryte* le baryum, la *strontiane* le strontium et la *chaux* le calcium.

[1] V. Antzoulatos, Comment enseigner la formulation ?, *L'Act. Chim.*, **2016**, *407*, p. 27-29, https://new.societechimiquedefrance.fr/numero/comment-enseigner-la-formulation-p27-n407

[2] V. Nardello-Rataj, L. H. T. Taï, J.-M. Aubry, Les lessives en poudre : un siècle d'innovations pour éliminer les taches, *L'Act. Chim.*, **2003**, *262*, p. 3-10, https://new.societechimiquedefrance.fr/numero/les-lessives-en-poudre-un-siecle-dinnovations-pour-eliminer-les-taches-p3-n264

[3] P. Avenas, À propos de savons, *L'Act. Chim.*, **2023**, *487*, p. 3, https://new.societechimiquedefrance.fr/numero/a-propos-de-savons-p3-n487

[4] L.-J. Gay-Lussac, *Cours de chimie. Tome second, par M. Gay-Lussac, comprenant l'histoire des sels, la chimie végétale et animale*, Pichon et Didier, **1828**.

[5] J. Verne, *L'Île Mystérieuse*, Hetzel, **1875**.

[6] D. Ciardi, I. Retailleau, F. Tournilhac, The soap opera of metal catalysis in epoxy-acid vitrimers, *Macromolecules*, **2025**, *58*, p. 3377-85, https://doi.org/10.1021/acs.macromol.4c03067

[7] S. Dalí, *50 secrets magiques*, Edita, **1974**.

[8] V. Gonzalez, T. Calligaro, M. Cotte, D. Gourier, G. Wallez, Les composés au plomb des peintures historiques sous rayonnement synchrotron, *L'Act. Chim.*, **2025**, *506*, p. 23-28, https://new.societechimiquedefrance.fr/numero/les-composes-au-plomb-des-peintures-historiques-sous-rayonnement-synchrotron-synthese-proprietes-optiques-et-reactivite-p23-n506

[9] B. Guineau, F. Delamare, *Les matériaux de la couleur*, Gallimard, **1999**.

[10] C.-E. Guignet, *Les Couleurs*, Hachette et Cie, **1889**.

[11] F. C. Izzo, M. Kratter, A. Nevin, E. Zendri, A critical review on the analysis of metal soaps in oil paintings, *ChemistryOpen*, **2021**, *10*, p. 904-21, https://doi.org/10.1002/open.202100166

[12] A. Artesani, Zinc oxide instability in drying oil paint, *Mater. Chem. Phys.*, **2020**, *255*, art. 123640, https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2020.123640

[13] J. J. Hermans *et al.*, 2D-IR Spectroscopy for oil paint conservation: elucidating the water-sensitive structure of zinc carboxylate clusters in ionomers, *Sci. Adv.*, **2019**, *5*, https://doi.org/10.1126/sciadv.aaw3592

[14] M. Cotte *et al.*, Lead soaps in paintings: friends or foes?, *Stud. Conserv.*, **2017**, *62*, p. 2-23, https://doi.org/10.1080/00393630.2016.1232529

[15] E. Rocca, F. Mirambet, Des savons métalliques pour la protection du patrimoine, *L'Act. Chim.*, **2007**, *312-313*, p. 65-70, https://new.societechimiquedefrance.fr/numero/des-savons-metalliques-pour-la-protection-du-patrimoine-p65-n312-313

[16] D. Montarnal, M. Capelot, F. Tournilhac, L. Leibler, Silica-like malleable materials from permanent organic networks, *Science* **2011**, *334*, p. 965-68, https://doi.org/10.1126/science.1212648

[17] M. Capelot, M. M. Unterlass, F. Tournilhac, L. Leibler, Catalytic control of the vitrimer glass transition, *ACS Macro Lett.*, **2012**, *1*, p. 789-92, https://doi.org/10.1021/mz300239f

[18] S. Chappuis, P. Edera, M. Cloitre, F. Tournilhac, Enriching an exchangeable network with one of its components: the key to high-Tg epoxy vitrimers with accelerated relaxation, *Macromolecules* **2022**, *55*, p. 6982-91, https://doi.org/10.1021/acs.macromol.2c01005

[19] Q.-A. Poutrel, I. Retailleau, U. Lafont, O. Damiano, F. Tournilhac, Thermolatent heterogeneous epoxy–acid formulation for the manufacture of preimpregnated sheets and composites with vitrimer properties, *ACS Appl. Polym. Mater.*, **2023**, p. 6095-106, https://doi.org/10.1021/acsapm.3c00778

[20] www.rte-france.com/donnees-publications/eco2mix-donnees-temps-reel/production-electricite-par-filiere (consulté le 17/09/26).

[21] International Energy Agency, Special Report on Solar PV Global Supply Chains, **2022**, https://doi.org/10.1787/9e8b0121-en

[22] www.pepr-tase.fr/projet/smart4module (consulté le 17/09/26).



Batteries au magnésium ou au calcium

Concept, évolution et état de l'art

Alexandre PONROUCH et M. Rosa PALACIN

Institut de Ciència de Materials de Barcelona, ICMAB-CSIC, Campus UAB, 08193 Bellaterra, Catalonia (Espagne).
✉ rosa.palacin@icmab.es

Résumé La recherche pour développer des nouvelles technologies de batteries répond aux besoins scientifiques et sociétaux actuels. La commercialisation d'une nouvelle technologie exige plusieurs étapes strictes. Les batteries au magnésium ou au calcium avec électrode négative métallique offrent un concept prometteur pour de grandes densités d'énergie. Leurs ions, très polarisants en raison de leur charge élevée, interagissent fortement avec l'électrolyte et les matériaux d'électrode limitant leur mobilité. Le calcium présente plus de défis avec son potentiel standard plus bas. Les deux systèmes nécessitent des électrolytes permettant un dépôt électrochimique réversible, avec le soufre et les matériaux organiques comme options principales en tant qu'électrode positive. Malgré la preuve de concept des batteries au magnésium en 2000 et les progrès plus récents pour le calcium, leur commercialisation n'est pas encore d'actualité en raison d'importants verrous technologiques nécessitant encore des efforts en recherche fondamentale avant de pouvoir envisager leur viabilité commerciale.

Mots-clés **Batteries, post-Li, calcium, magnésium, électrode métallique.**

Abstract **Magnesium or calcium batteries: concept, evolution and state of the art**
Research to develop new battery technologies meets current scientific and societal needs. Bringing a new technology to market requires several strict steps. Magnesium or calcium batteries with metal anodes offer a promising concept for high energy densities. Their ions, highly polarizing due to their high charge, interact strongly with the electrolyte and electrode materials. Calcium presents more of a challenge due to its lower reduction potential. Both systems require electrolytes that enable efficient electroplating, with sulfur and organic compounds being the main options as positive electrode material. Despite the proof-of-concept of magnesium batteries in 2000, and the progress made with calcium, their commercialization is still some way off, as there are still a number of technological hurdles to be overcome. Fundamental research should enable us to determine their viability in the future.

Keywords **Batteries, post-Li, calcium, magnesium, metal electrode.**

https://doi.org/10.63133/scf.act-chim.2026.519.03

Notre société moderne demande des dispositifs de stockage d'énergie pour de nombreuses applications en constante évolution, chacune ayant des exigences très spécifiques. Une batterie destinée à un véhicule électrique diffère de celle utilisée dans un pacemaker. Il est donc particulièrement pertinent de diversifier ces technologies de batteries afin de s'adapter à chaque application. Il est également crucial de considérer la durabilité de ces nouvelles technologies, surtout pour des applications à grande échelle, comme le stockage lié au réseau électrique, pour lesquelles de grandes quantités de matière première sont requises.

Pour développer une nouvelle technologie, il est souvent nécessaire de partir de zéro, en s'appuyant sur de petites expériences en laboratoire avec quelques grammes de composé. Si ces expériences s'avèrent concluantes, un investissement plus important en termes de ressources, de personnel et de matériaux devient alors nécessaire. Le progrès se fait donc de manière graduelle tel que décrit par l'échelle de TRL (« *technology readiness level* »), développée par la NASA après la Seconde Guerre mondiale. Après les premières phases effectuées en laboratoire, la fabrication de prototypes (échelle pilote) est requise avant d'atteindre la production [1]. À chaque étape, deux paramètres doivent être pris en compte : le risque et l'investissement, et des tests sont donc effectués afin d'analyser les résultats suivis d'extrapolations. Cependant, il est crucial de noter que ces extrapolations peuvent être biaisées par des paramètres tels que la quantité limitée de matière active, l'excès d'électrolyte ou la géométrie de cellule qui ne sont pas représentatifs des conditions réelles d'utilisation des batteries [2].

Il est également essentiel de prendre en compte la durabilité de l'ensemble des procédés mis en œuvre (voir *figure 1*). La première étape consiste à sélectionner des matériaux abondants, bien que cela réduit considérablement le champ des possibles. Le coût constitue également un facteur déterminant. Ainsi, même si les performances sont excellentes et que les éléments utilisés sont abondants, une technologie ne pourra jamais être commercialisée si elle n'atteint pas un coût compétitif (en $/kWh, voir *figure 2*). Compte tenu de toutes ces considérations, il est particulièrement complexe de développer de nouvelles technologies de batteries [3]. Un exemple intéressant est la technologie sodium-ion, analogue de la technologie lithium-ion avec des ions Na^+ au lieu de Li^+ en tant que porteurs de charge, et qui sera bientôt produite par TIAMAT à grande échelle dans le nord de la France [4].

L'objectif de cet article est de décrire l'état de l'art des batteries à base d'électrode négative métallique, qui pourraient *a priori* avoir des très grandes densités d'énergie, en se focalisant

Génération de concepts → Production					
	Validation de concept	**Recherche**	**Recherche appliquée**	**Développement**	**Développement avancé**
	Une idée dans un esprit créatif	Montée en échelle	Cellules de laboratoire/prototype	Validation des résultats de recherche	Conception de la cellule unitaire
	Tests exploratoires en laboratoire	Caractérisation des propriétés fondamentales du concept, de la chimie, de la composition, de la structure, etc.	Carte initiale des performances, vitesses, cyclage, température, etc.	Définition du format initial du produit	Conception et réalisation des étapes de fabrication
	Établir la répétabilité des performances	Évaluer l'ampleur de l'opportunité commerciale	Montée en échelle de la préparation des matériaux	Mise au point des opérations d'assemblage des unités	Montée en échelle de la fabrication des cellules prototypes
	Y a-t-il un marché ?		Portée préliminaire du marché	Fabriquer, tester et caractériser 5 à 10 lots de cellules de 100 unités	Réaliser 3 à 5 essais pilotes significatifs en ligne - usine
				Élaborer un plan d'affaires	Achever le plan d'affaires
					Développement du marché
Temps	1 à 3 ans	1 à 3 ans	3 à 4 ans	3 à 5 ans	3 à 4 ans
Effectifs	1	2 à 4	4 à 10	8 à 16	12 à 30
Quantité de matériaux	Grammes	10 à 50 g	100 g à 1 kg	1 à 10 kg	10 à 100 kg

Figure 1 - Vue d'ensemble du processus global de R&D des batteries, depuis la phase de conception jusqu'à la production, avec des indications sur les délais estimés, le personnel et les quantités de matériaux nécessaires pour chaque étape, telle que définie par Ralph Brodd, un des pionniers dans le domaine des batteries Li-ion [1].

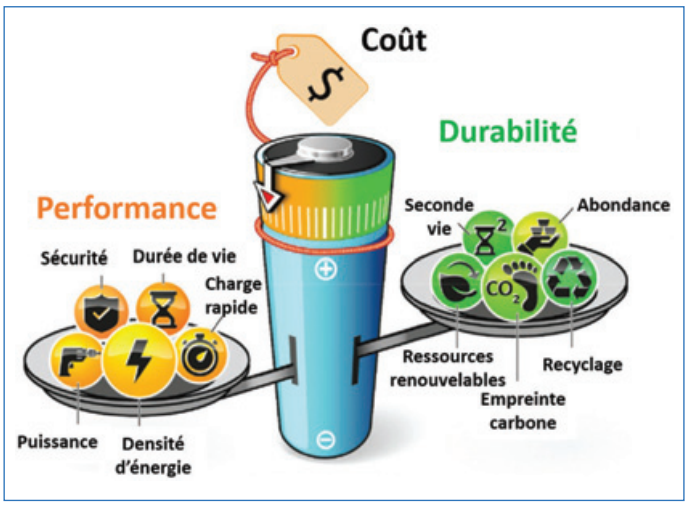


Figure 2 - Illustration schématique des objectifs de développement de technologies de batteries, incluant les aspects de coût, de durabilité et de performance, ces derniers étant cruciaux, traduit de [3] © The Authors, CC BY 4.0.

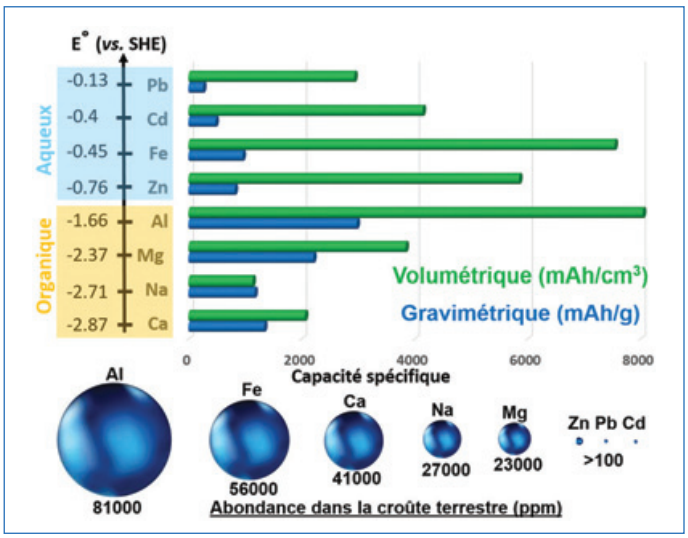


Figure 3 - Capacités gravimétriques et volumétriques théoriques, potentiels standards et abondances dans la croûte terrestre de différentes électrodes métalliques.

sur le cas de nouvelles chimies à base de calcium et magnésium qui sont actuellement à l'étape de la validation de concept (*figure 1*).

Batteries à électrode négative métallique

Bien qu'on puisse penser à des technologies de batteries très diverses en combinant différents matériaux aux électrodes positive et négative, les plus hautes densités d'énergie ne seront atteintes qu'avec l'utilisation de métaux, qui présentent des capacités spécifiques élevées (*figure 3*) par l'absence d'éléments inactifs dans leur composition. Divers métaux ont été utilisés comme matériaux d'électrode depuis la création de la batterie de Volta, mais il est important de noter qu'à l'heure actuelle, presque toutes les technologies commerciales qui les emploient sont primaires (non rechargeables), telles que Zn/MnO_2. Le développement de batteries rechargeables a été entravé par des problèmes de sécurité associés à la formation de dendrites lors de dépôt électrochimique des métaux. Ceci est le cas aussi pour les batteries à base de lithium métal (à ne pas confondre avec la technologie lithium-ion qui contient normalement une électrode négative de graphite). Néanmoins, la recherche se poursuit activement, car le dépôt électrochimique réversible des métaux pourrait conduire à des batteries avec une densité d'énergie considérable (en Wh/kg ou Wh/L) et bien plus élevée que celle de la technologie Li-ion [5].

Une technologie possible reposant sur l'électrodéposition du lithium est celle des batteries à électrolyte solide. En raison des aspects purement mécaniques, il est anticipé que la croissance dendritique du lithium soit limitée et la non-inflammabilité de ces électrolytes constitue un avantage certain en termes de sécurité. Les électrolytes polymères sont déjà commercialisés par la société *Blue Solutions*. Certains constructeurs automobiles ont annoncé le futur déploiement de batteries tout solide, parfois avec des électrolytes basés sur des solides inorganiques, mais les échéances ont été repoussées en raison de

problèmes non résolus. Ces problèmes concernent la compatibilité entre les différents composants de la batterie (certains conducteurs ioniques sont réduits au contact du lithium métal) et la difficulté de maintenir un bon transport ionique à travers les interfaces solide/solide. D'autres exigences pratiques incluent le maintien d'une certaine pression pendant le fonctionnement de la batterie (de l'ordre du MPa) afin d'assurer un bon contact électrique, ainsi qu'une température élevée (~ 70 °C pour les électrolytes polymères) pour favoriser la conductivité ionique de l'électrolyte [6]. La compatibilité des batteries tout solide avec une production à grande échelle demeure un défi majeur. Elle est notamment limitée par les problèmes potentiels de compatibilité entre les propriétés mécaniques des électrolytes solides, en particulier ceux de type inorganique, et les méthodes d'assemblage conventionnelles. En effet, ces électrolytes sont difficilement compatibles avec les procédés industriels actuels, qui reposent majoritairement sur des techniques rouleau-à-rouleau (« *roll-to-roll* ») utilisées dans la fabrication des batteries Li-ion commerciales.

La faisabilité de l'utilisation d'autres métaux comme électrodes négatives dépendra de l'efficacité du processus d'électrodéposition (réversibilité et absence de dendrites). La *figure 3* présente certaines propriétés des métaux susceptibles d'être utilisés comme électrodes dans les technologies de batteries rechargeables. Dû à leur potentiel standard de réduction, le fer, le zinc, le cadmium et le plomb pourraient entraîner des énergies spécifiques relativement faibles. Cependant, le zinc et le fer, qui présentent l'avantage d'être non toxiques contrairement au cadmium ou au plomb, sont intéressants en raison de leur faible coût. Le zinc, qui possède un potentiel de réduction standard plus négatif, a donc motivé de nombreux efforts pour rendre la technologie Zn/MnO_2 rechargeable. Toutefois, la faisabilité de cette stratégie reste incertaine en raison, non seulement de la tendance à la croissance dendritique, mais aussi de la corrosion de l'électrode de zinc, surtout si le pH de l'électrolyte n'est pas suffisamment alcalin. Par ailleurs, le mécanisme d'oxydoréduction à l'électrode positive demeure controversé [7].

D'autres métaux tels que le magnésium, le calcium ou l'aluminium, bien que peu coûteux et abondants dans la croûte terrestre, présentent des potentiels de réduction standard fortement négatifs et donc intéressants pour donner lieu à des potentiels de cellule élevés. Ceci dit, ces valeurs ne sont pas compatibles avec des électrolytes aqueux, nécessitant ainsi l'utilisation de solvants organiques. Certains de ces métaux ont été intégrés dans des batteries primaires (aluminium/air), l'intérêt pour le développement de technologies secondaires est plus récent. La preuve de concept d'une batterie rechargeable utilisant le magnésium métal comme électrode négative a été démontrée en 2000, avec un électrolyte corrosif, pyrophorique et une stabilité anodique limitée [8]. Le dépôt électrochimique de calcium métal en milieu organique a été démontré bien plus tard, en 2015 [9]. La technologie à base d'aluminium souffre quant à elle de nombreux verrous technologiques limitant sa densité d'énergie. Le potentiel standard relativement élevé de l'aluminium ne permet pas l'assemblage de batterie à haute tension de cellule et le processus redox à l'électrode négative n'est le plus souvent pas basé sur le dépôt électrochimique d'aluminium, mais sur des changements d´état d'oxydation de complexes anioniques limitant fortement la capacité spécifique de l'électrode négative. Enfin, le fort pouvoir polarisant des cations Al^{3+} rend pratiquement impossible leur insertion réversible au sein de possibles électrodes positives. Des électrodes de graphite insérant des anions sont alors utilisées avec une capacité spécifique relativement limitée (< 100 mAh/g) [10].

Le principal problème pour développer une nouvelle technologie réside dans l'absence de composés de référence, de standards et de protocoles établis, car ce n'est pas toujours possible ou pertinent d'appliquer l'expertise acquise avec d'autres technologies, comme le lithium-ion. Il est donc impératif d'adopter une approche prudente lors de l'interprétation des résultats, car des réactions parasites peuvent survenir, rendant la méthodologie cruciale [11]. En complément des protocoles électrochimiques, il est indispensable d'utiliser des techniques de caractérisation complémentaires (non électrochimiques) afin de s'assurer de la nature des processus redox (réactivité de M^{n+} *vs.* réactions parasites) [12].

Lorsqu'on envisage des technologies de batteries basées sur des ions divalents, tels que le magnésium ou le calcium, il faut d'abord établir s'il y a formation d'une couche dite « *solid electrolyte interphase* » (SEI) ou non. Le terme SEI a été introduit par Emmanuel Peled en 1979 après des études sur les électrolytes en contact avec des anodes de lithium métallique. La plupart des électrolytes ne sont pas thermodynamiquement stables à des potentiels aussi bas et se réduisent pour former un mélange de composés (oxyde de lithium, fluorure de lithium, carbonate, composés organiques, etc.) qui adhèrent à la surface de l'électrode, modifiant ainsi la nature de l'interface électrode/électrolyte. Cette SEI est essentielle au fonctionnement de la batterie hors du domaine de stabilité électrochimique des électrolytes, et doit permettre le passage des ions lithium (conductrice ionique), mais également être isolante électronique [13]. Pour le magnésium, vu son potentiel standard de réduction relativement élevé, il est envisageable de pouvoir fonctionner sans SEI ; cependant, le potentiel standard fortement négatif du calcium implique la formation quasi-certaine d'une couche de passivation compliquant fortement la recherche d'électrolytes compatibles. En effet, la grande majorité des composés formant ces couches de passivation sont de très mauvais conducteurs de cations divalents [14].

La recherche de nouveaux électrolytes constitue donc un aspect crucial pour le développement de batteries au calcium et au magnésium. Notamment, le fort pouvoir polarisant de Mg^{2+} ou Ca^{2+}, dont les rayons ioniques sont similaires à ceux de Li^+ et Na^+ (respectivement 76 et 102 Å), implique de fortes interactions coulombiennes avec son environnement pouvant conduire à la formation de paires ioniques (favorisant la décomposition des anions à l'électrode négative), des énergies de solvatation élevées (facilitant les processus de co-intercalation) et un transport de masse limité dans la structure cristalline de possibles matériaux d'électrode (plus marqué dans les oxydes que dans les sulfures en raison de la différente polarisabilité des anions oxyde et sulfure). De plus, la tendance à la formation de paires ioniques ainsi qu'un nombre de coordination élevé de Mg^{2+} ou Ca^{2+} (typiquement entre 6 et 8, contre 3-4 pour Li^+) conduit à des conductivités ioniques des électrolytes relativement faibles (typiquement entre 1 et 6 $mS{\cdot}cm^{-1}$ contre 8 à 12 $mS{\cdot}cm^{-1}$ pour des électrolytes Li). La nature des complexes présents en solution dépend fortement de la taille de l'anion et de la délocalisation de sa charge, des propriétés du solvant (nombre donneur DN, possibilité de coordination mono- ou multidentate), ainsi que de la concentration de l'électrolyte. Contrairement aux cations monovalents tels que Li^+ et Na^+, Ca^{2+} et Mg^{2+} peuvent former des paires ioniques

chargées positivement (de type MX^+, avec M un cation divalent et X un anion monovalent), et donc participer aux réactions redox en tant que porteurs de charge, contrairement aux paires ioniques neutres formées par Li^+ et Na^+.
La compatibilité de possibles candidats d'électrodes positives avec des cations divalents constitue également un défi important pour le développement de ces nouvelles chimies de batterie. Par exemple, en considérant TiS_2, un composé d'intercalation largement étudié, la réduction de Ti(IV) à Ti(III) (un électron) peut être compensée soit par l'insertion d'une mole d'ion monovalent, soit par l'insertion d'une demi-mole d'ion divalent, ou un tiers pour des ions trivalents. La capacité reste identique, mais en intercalant moins d'ions, la distorsion structurale est réduite, ce qui pourrait améliorer la cyclabilité. Alternativement, si l'on envisage d'intercaler une mole d'ions pour un ion divalent, la capacité serait doublée par rapport à un ion monovalent. Dans ce cas, on passerait de Ti(IV) à Ti(III) pour les ions monovalents, mais pour des ions divalents, il faudrait envisager Ti(II). La possibilité de réduire davantage TiS_2 a déjà été démontrée par John Goodenough en 2009, mais lorsque la réduction atteint Ti(II), le potentiel est considérablement plus bas. Ainsi, bien qu'il soit possible d'augmenter légèrement la capacité si la structure peut accepter plus d'ions, la réaction se produira généralement à un potentiel différent, ce qui aura des implications pour la densité énergétique de la batterie.

Batteries au magnésium

Avant toute recherche sur une nouvelle chimie de batterie, il est intéressant de procéder à une évaluation préliminaire de la densité d´énergie théorique au niveau d'une simple cellule. Pour des batteries avec électrode négative de Mg métal, cela a été fait en considérant un excès de 50 % de Mg à l'électrode négative et une électrode positive de type composite de porosité et densité similaires à celles utilisées dans les batteries lithium-ion (30 % et 3 g/cm^3, respectivement), ainsi qu'une densité d'électrolytes comparable (1 g/cm^3) [15]. Les résultats de ces simples calculs montrent qu'une batterie avec électrode négative de Mg métallique pourrait difficilement présenter des densités d'énergie volumétrique ou gravimétrique comparables aux Li-ion. Entre autres candidats d'électrode positive, les matériaux d'insertion à base d'oxyde présenteraient un avantage en termes de potentiel d'opération par rapport aux sulfures, mais souffrent d'un transport de masse de Mg^{2+} plus limité et, à ce jour, aucun n'a pu démontrer une insertion réversible. Le soufre présente quant à lui une capacité spécifique très élevée (1675 mAh/g), mais un potentiel de travail très bas (*ca.* 1,5 V *vs.* Mg^{2+}/Mg) [16]. Actuellement, les matériaux organiques, bien que présentant des capacités spécifiques et des potentiels de travail relativement faibles (*ca*. 100 mAh/g et 2,5-3 V *vs.* Mg^{2+}/Mg), demeurent les matériaux d'électrode positive les plus prometteurs grâce à un processus de charge/décharge basé sur un mécanisme de coordination tel que l'énolisation de groupement carbonyle par le cation (coordination du groupement C=O par un cation M^{x+} pour former le complexe C-O-M), qui semble contourner le problème de diffusion au solide de Mg^{2+} et permet un cyclage à courants de charge/décharge élevés [17]. De plus, le faible coût de production, l'absence de matières premières critiques et la possible biodégradabilité de ces électrodes positives en font une alternative particulièrement attractive. Les performances de futures batteries Mg ne seront donc, *a priori*, pas à la hauteur de celle des Li-ion, notamment à cause de la valeur relativement élevée du potentiel standard du Mg (-2,37 V *vs.* SHE) impliquant une faible tension de cellule. Cependant, elles pourraient être utilisées pour des applications où la densité d'énergie n'est pas aussi critique que pour les applications portables, telles que les applications stationnaires (réseau électrique). Cette technologie pourrait présenter un avantage en termes de durabilité et d'approvisionnement en matière première et possiblement en termes de coût de production si des électrodes positives comme le soufre ou des matériaux organiques sont utilisées.
L'un des principaux obstacles au développement des batteries au magnésium réside dans la conception d'électrolytes permettant le dépôt et la dissolution électrochimiques réversibles du Mg métallique [18]. Les premiers dépôts de Mg ont été réalisés dès 1927 à partir de réactifs de Grignard, puis industrialisés en 1941 par Dow Chemical *via* l'électrolyse de $MgCl_2$. En 2000, le groupe de Doron Aurbach a démontré la première batterie Mg rechargeable en associant un électrolyte de type Grignard à une phase de Chevrel comme électrode positive [19]. Malgré sa capacité d'insertion de deux ions Mg^{2+} par unité de formule, ce système présentait une faible densité d'énergie ainsi qu'un électrolyte corrosif et pyrophorique, incompatible avec une application commerciale.
Depuis, plusieurs générations d'électrolytes ont été développées afin d'améliorer leur stabilité anodique et leur sécurité. Les électrolytes complexes tout phényle (APC, « *all phenyl complex* »), puis les systèmes inorganiques $MgCl_2$–$AlCl_3$ (MACC, « *magnesium aluminium chloride complex* »), ont permis des progrès significatifs, mais restent limités par des problèmes de corrosion et de cinétique. Plus récemment, des électrolytes non chlorés à base d'anions faiblement coordinants, notamment $Mg[B(hfip)_4]_2$ ou $Mg[Al(hfip)_4]_2$ (hfip=$OC(H)(CF_3)_2$), ont montré d'excellentes performances et constituent aujourd'hui l'état de l'art.
Du côté de l'électrode positive, le composé VS_4, qui contient V^{4+} et des ions S_2^{2-}, semble prometteur avec une capacité théorique intéressante qui résulte de l'activité redox du vanadium et du soufre. Le soufre lui-même est aussi intéressant, ainsi que les composés organiques du fait l'abondance de leurs précurseurs. Il existe notamment une grande variété d'électrodes positives organiques telles que la polyanthraquinone dont le mécanisme de stockage de charge a pu être étudié par spectroscopie infrarouge *operando*, permettant l'observation de l'énolisation des groupements carbonyle par les cations [17]. Cependant, la capacité spécifique de ces électrodes positives (~ 80 mAh/g) reste limitée en cellule magnésium en comparaison à celle obtenue en cellule lithium (~ 160 mAh/g). L'origine de cette différence de performance reste peu comprise ; cependant, la formation de paires ioniques comme porteurs de charge a été identifiée comme potentiel paramètre limitant la capacité spécifique [20]. Pour ce qui est de l'assemblage de prototypes, de nombreux défis restent à relever afin de produire des cellules de haute densité d'énergie. Notamment, la fabrication de films minces de magnésium métal ou d'alliages pour l'électrode négative ainsi que le développement et la formulation d'électrodes positives à hautes capacités spécifiques telles que VS_4 ou soufre [21].

Batteries au calcium

En ce qui concerne le calcium, le même exercice d'évaluation de la densité d'énergie théorique a été réalisé en tenant

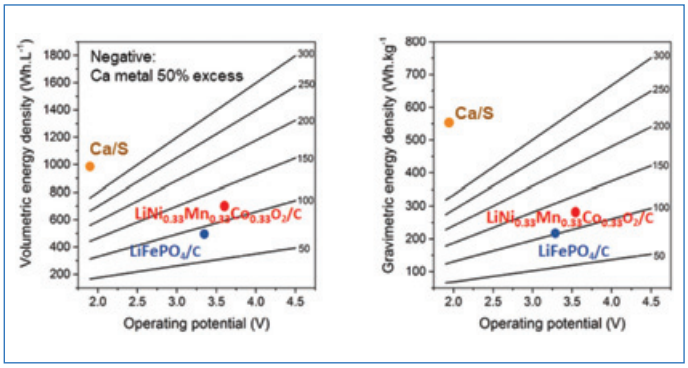


Figure 4 - Densités d'énergie volumétrique et gravimétrique pour certaines batteries lithium-ion actuelles et des technologies hypothétiques de batteries au calcium. Les droites correspondent aux densités d'énergie calculées de batteries au calcium en fonction du potentiel de fonctionnement et des capacités spécifiques d'hypothétiques électrodes positives (indiquées à droite de chaque droite) [22].

compte de la masse des électrodes, des séparateurs, des collecteurs de courant ainsi que celle de l'électrolyte [22]. Un excès de 50 % ou 100 %, respectivement avec ou sans collecteur de courant à l'électrode négative afin de considérer la possibilité de s'affranchir de l'utilisation d'un collecteur de courant (typiquement Cu ou Al), est envisageable grâce la bonne tenue mécanique du Ca métal. À l'électrode positive, étant donné le peu de matériaux d'électrode disponibles à ce jour, des composés hypothétiques ont été considérés ayant des capacités spécifiques de 50, 100, 150, 200 mAh/g et des potentiels de travail entre 2,0 et 4,5 V *vs.* Ca^{2+}/Ca. Il s'avère alors qu'une batterie avec une électrode négative de Ca métal et une électrode positive hypothétique opérant à 3 V *vs.* Ca^{2+}/Ca avec une capacité spécifique de 150 mAh/g aurait une densité d'énergie (massique et volumétrique) comparable à une batterie Li-ion NMC//graphite (NMC = $LiNi_{0.33}Mn_{0.33}Co_{0.33}O_2$). Des densités d'énergie encore plus élevées pourraient être obtenues en développant des électrodes positives avec une capacité spécifique plus grande et/ou un potentiel de travail plus élevé. Ainsi, le soufre serait un candidat très prometteur et les batteries Ca/S pourraient, notamment, présenter des densités d'énergies volumétriques sensiblement plus importantes que les batteries Li/S grâce à la plus grande densité du Ca (1,55 g/cm^3) en comparaison avec Li (0,534 g/cm^3) (*figure 4*). En ce qui concerne le développement d'électrolytes, étant donné le potentiel standard de réduction extrêmement bas du Ca (500 mV plus bas que celui du Mg), il est virtuellement impossible de formuler des électrolytes parfaitement stables au contact du Ca métal. La présence d'une couche de passivation est donc inévitable, cette dernière devant posséder les propriétés d'une SEI (i.e. conductrice cationique et isolante électroniquement).

Historiquement, les recherches sur les batteries calcium ont été plus limitées et l'absence d'équivalent Ca des réactifs de Grignard initialement utilisés pour Mg a considérablement freiné la recherche sur cette chimie de batterie. En 1991, le groupe de Doron Aurbach a rapporté que le dépôt électrochimique de calcium dans des électrolytes organiques n'était pas possible, à cause de la présence d'une couche de passivation ne laissant pas passer les ions calcium. Cette absence d'électrolyte ainsi que de protocoles électrochimiques fiables pour tester de potentiels nouveaux matériaux d'électrodes positives a considérablement limité la recherche dans ce domaine. Dans le cadre d'un projet financé par Toyota, une première étude a démontré la faisabilité du dépôt électrochimique de calcium avec un électrolyte organique (0,45 M $Ca(BF_4)_2$ dans un mélange de carbonate d'éthylène et de propylène) [9]. Une température d'opération de 100 °C était alors nécessaire afin d'améliorer la mobilité des cations en solution et de permettre leur passage au travers de la couche de passivation existante à la surface du Ca. Même si l'efficacité coulombique ainsi que la température d'opération restaient à améliorer, cela a permis de démontrer la possible viabilité des batteries au calcium métal. Depuis, le dépôt électrochimique de Ca à température ambiante a également pu être démontré, notamment grâce à l'utilisation de différents sels de Ca tels que $Ca(BH_4)_2$, $Ca(CB_{11}H_{12})_2$ et $Ca[B(hfip)_4]_2$, ainsi que de solvants éthérés (principalement le tétrahydrofurane (THF) ou le mono- ou diglyme) [12]. Ces nouveaux électrolytes souffrent cependant d'une stabilité anodique limitée (en milieu THF) ou d'une solubilité limitée du sel de Ca (pour $Ca(CB_{11}H_{12})_2$). Dans tous les cas, l'efficacité coulombique du dépôt de Ca reste insuffisante (typiquement inférieur à 85 %) et une compréhension approfondie de la nature et des propriétés des interfaces reste essentielle pour le développement des batteries Ca.

La présence de polymères incluant des fonctions BO_3 dans la SEI formée dans des électrolytes permettant le dépôt de Ca a été mise en évidence par diverses techniques spectroscopiques. L'importance de ces borates pour la migration des cations au sein de la SEI a alors été démontrée lors de tests de pré-passivation de substrats, permettant ainsi le dépôt de Ca dans des électrolytes qui normalement ne le permettent pas, tel que le bis(trifluorométhanesulfonyl)imide de calcium ($Ca(TFSI)_2$) dans un mélange EC:PC [14]. Les principaux axes de recherche visant à améliorer la réversibilité du dépôt électrochimique du Ca portent ainsi sur la conception d'électrolytes capables de favoriser la formation d'une SEI stable et la migration des cations, tout en optimisant leur mobilité dans l'électrolyte et en abaissant les barrières énergétiques des processus interfacials, en particulier celles associées à la désolvatation. Du côté de l'électrode positive, on se trouve dans une situation similaire au cas du magnésium. Jean Rouxel à Nantes avait déjà intercalé chimiquement du calcium dans le TiS_2 en 1974, à partir d'une dissolution de calcium dans de l'ammoniaque. L'ammoniaque était alors co-intercalé et pouvait être éliminé par chauffage. Électro-chimiquement, le processus de co-intercalation du solvant a également été observé, plus particulièrement en présence de PC [23]. Cependant, et de même que pour les batteries au Mg, le soufre ainsi que les composés organiques semblent être les matériaux d'électrode positive les plus prometteurs. Ces derniers, et notamment les polyimides, présentent à ce jour les meilleures performances en termes de cyclabilité et de maintien de la capacité spécifique en cyclage [24]. Finalement, ce cercle très fermé des électrodes positives permettant une bonne stabilité en cyclage (plusieurs centaines de cycles de charge/décharge sans perte notable de capacité) ainsi qu'une performance en puissance a récemment été élargi avec une nouvelle famille de polymères de coordination ayant la particularité d'être « pré-calciés », et donc compatibles avec des batteries sans anode métallique.

Perspectives : les principaux défis à relever

Le développement de nouvelles technologies de batteries reposant sur des électrodes négatives métalliques, en particulier à base de magnésium et de calcium, offre des perspectives intéressantes en termes de densité d'énergie, de durabilité,

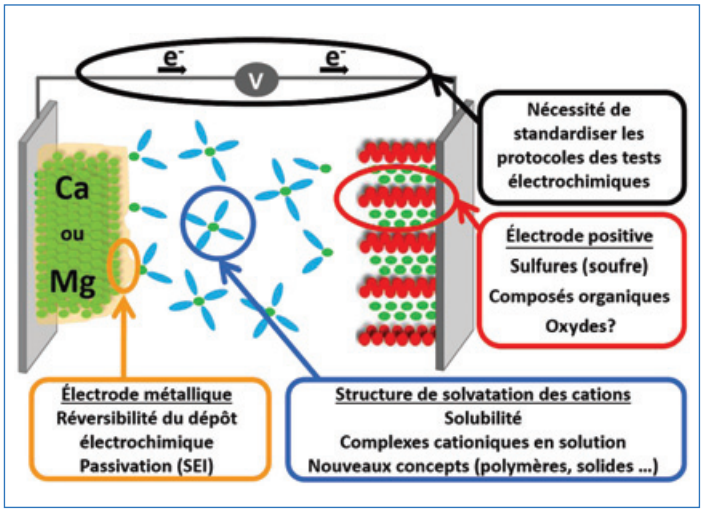


Figure 5 - Principaux défis à relever pour le développement de nouvelles technologies de batteries à base d'électrodes négatives de calcium ou magnésium métallique.

d'abondance des ressources et de sécurité d'approvisionnement. Même s'il y a eu des avancées récentes dans la conception d'électrolytes innovants et de l'utilisation de composés organiques ou du soufre comme électrode positive, ces systèmes restent confrontés à de nombreux verrous scientifiques et technologiques (*figure 5*). À l'heure actuelle les prototypes de cellules avec électrodes de Mg métal ne fournissent que des densités d'énergie limitées [21] et dans le cas du Ca, la recherche se focalise sur l'étude des composants individuels de la batterie (surtout matériaux d'électrode positive et électrolyte) et leur compatibilité. Il est donc nécessaire de mener des recherches fondamentales sur les mécanismes de réaction en adoptant des méthodologies rigoureuses et une approche intégrée, afin d'évaluer de manière réaliste le rôle que ces technologies alternatives pourront jouer dans le futur paysage du stockage de l'énergie (*figure 5*).

Remerciements

Les auteurs remercient l'Agence espagnole de la recherche (Agencia Estatal de Investigación) dans le cadre du programme Severo Ochoa pour les centres d'excellence en R&D (CEX2023-001263-S) et les institutions et entreprises ayant financé leurs travaux, ainsi que l'ensemble des collaborateurs avec lesquels ils ont eu le plaisir de travailler dans le domaine des batteries. Ils expriment également leur gratitude aux membres académiques et industriels de l'ALISTORE-ERI pour les discussions enrichissantes, les échanges fructueux et les collaborations.

[1] M.R. Palacin, Battery materials design essentials., *Acc. Mater. Res.*, **2021**, *2*, p. 319-26, https://doi.org/10.1021/accountsmr.1c00026
[2] J.T. Frith, M.J. Lacey, U. Ulissi, A non-academic perspective on the future of lithium-based batteries, *Nat. Comm.*, **2023**, *14*, https://doi.org/10.1038/s41467-023-35933-2
[3] S. Dühnen, J. Betz, M. Kolek, R. Schmuch, M. Winter, Toward green battery cells: Perspective on materials and technologies, *Small Methods*, **2020**, *4*, 2000039, https://doi.org/10.1002/smtd.202000039
[4] TIAMAT Energy, *TIAMAT sodium-ion battery*, www.tiamat-energy.com
[5] M.R. Palacin, Chemical journey into batteries: Some steps on the road, *L'Act. Chim.*, **2024**, *498*, p. 23-28, https://new.societechimiquedefrance.fr/numero/chemical-journey-into-batteries-some-steps-on-the-road-p23-n498/?lang=en
[6] J. Janek, W.G. Zeier, Challenges in speeding up solid-state battery development, *Nat. Ener.*, **2023**, *8*, p. 230-40, https://doi.org/10.1038/s41560-023-01208-9
[7] C. Li, S. Jin, L.A. Archer, L.F. Nazar, Toward practical aqueous zinc-ion batteries for electrochemical energy storage, *Joule*, **2022**, *6*, p. 1733-38, https://doi.org/10.1016/j.joule.2022.06.002
[8] D. Aurbach *et al.*, Prototype systems for rechargeable magnesium batteries, *Nature*, **2000**, *407*, p. 724-27, https://doi.org/10.1038/35037553
[9] A. Ponrouch, C. Frontera, F. Barde, M.R. Palacin, Towards a calcium-based rechargeable battery, *Nat. Mater.*, **2016**, *15*, p. 169-72, https://doi.org/10.1038/nmat4462
[10] K. Long Ng, B. Amrithraj, G. Azimi, Nonaqueous rechargeable aluminum batteries, *Joule*, **2022**, *6*, p. 134-170, https://doi.org/10.1016/j.joule.2021.12.003
[11] R. Dugas, J. Forero-Saboya, A. Ponrouch, Methods and protocols for reliable electrochemical testing in post-Li batteries (Na, K, Mg, and Ca), *Chem. Mater.*, **2019**, *31*, p. 8613-28, https://doi.org/10.1021/acs.chemmater.9b02776
[12] M.R. Palacin *et al.*, Roadmap on multivalent batteries, *J. Phys. Energy*, **2024**, *6*, 031501, https://doi.org/10.1088/2515-7655/ad34fc
[13] E. Peled, S. Menkin, Review - SEI: Past, Present and Future, *J. Electrochem. Soc.*, **2017**, *164*, https://doi.org/10.1149/2.1441707jes
[14] J. Forero-Saboya *et al.*, Understanding the nature of the passivation layer enabling reversible calcium plating, *Energy Environ. Sci.*, **2020**, *13*, p. 3423-31, https://doi.org/10.1039/d0ee02347g
[15] R. Dominko *et al.*, Magnesium batteries: Current picture and missing pieces of the puzzle, *J. Power Sources*, **2020**, *478*, 229027, https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2020.229027
[16] A. Robba *et al.*, Mechanistic Study of Magnesium–Sulfur Batteries, *Chem. Mater.*, **2017**, *29*, p. 9555-64, https://doi.org/10.1021/acs.chemmater.7b03956
[17] A. Vizintin *et al.*, Probing electrochemical reactions in organic cathode materials via in operando infrared spectroscopy, *Nat. Commun.*, **2018**, *9*, https://doi.org/10.1038/s41467-018-03114-1
[18] J.D. Forero-Saboya, D.S. Tchitchekova, P. Johansson, M.R. Palacín, A. Ponrouch, Interfaces and Interphases in Ca and Mg Batteries, *Adv. Mater. Interfaces*, **2022**, 2101578, https://doi.org/10.1002/admi.202101578
[19] D. Aurbach *et al.*, Prototype systems for rechargeable magnesium batteries, *Nature*, **2000**, *407*, p. 724-7, https://doi.org/10.1038/35037553
[20] H. Dong *et al.*, Directing Mg-Storage Chemistry in Organic Polymers toward High-Energy Mg Batteries, *Joule*, **2019**, *3*, p. 782-93, https://doi.org/10.1016/j.joule.2018.11.022
[21] J.A. Blázquez *et al.*, A practical perspective on the potential of rechargeable Mg batteries, *Energy Environ. Sci.*, **2023**, *16*, p. 1964-81, https://doi.org/10.1039/D2EE04121A
[22] D. Monti *et al.*, Multivalent batteries - Prospects for high energy density: Ca batteries, *Front. Chem.*, **2019**, *7*, 79, https://doi.org/10.3389/fchem.2019.00079
[23] D.S. Tchitchekova *et al.*, Electrochemical intercalation of calcium and magnesium in TiS_2: Fundamental studies related to multivalent battery applications, *Chem. Mater.*, **2018**, *30*, p. 847-56, https://doi.org/10.1021/acs.chemmater.7b04406
[24] K. Zhao *et al.*, Carbonyl-based organic electrode materials spanning from nonaqueous rechargeable lithium to calcium batteries, *Energy Environ. Sci.*, **2025**, *18*, p. 7756-91, https://doi.org/10.1039/d4ee06017b

Société Chimique de France
Le réseau des chimistes
Une association fondée en 1857 par les chimistes, pour les chimistes !
Rejoignez-nous !
www.societechimiquedefrance.fr
Société Chimique de France

Flux continu, catalyse hétérogène et économie d'atomes

Une combinaison idéale en synthèse organique à l'ère de la durabilité

Basile WEYL, Lénaïc LE GUÉDARD et Benjamin LAROCHE

ESPCI Paris-PSL, Unité C3M (UMR CNRS 7167).
✉ benjamin.laroche@espci.fr

Résumé La chimie en flux connaît aujourd'hui une implantation croissante dans les laboratoires académiques et industriels, où elle s'intègre de plus en plus aux pratiques synthétiques établies. Cet article présente les principes de cette approche et discute de ses avantages par rapport aux procédés traditionnels (*batch*), notamment en matière de contrôle réactionnel, de sécurité et de reproductibilité. Cette analyse nous conduira à examiner les catégories de transformations qui tirent un bénéfice particulier du mode continu et à en préciser les avantages spécifiques. Nous mettons enfin l'accent sur l'éco-compatibilité des transformations chimiques réalisées en flux, en particulier pour celles associant la (photo)catalyse hétérogène à une stratégie d'économie d'atomes – une combinaison idéale qui invite à repenser la synthèse organique face aux enjeux environnementaux.

Mots-clés **Synthèse organique, flux continu, catalyse hétérogène, économie d'atomes.**

Abstract **Continuous flow, heterogeneous catalysis, and atom economy: an ideal combination for organic synthesis in the era of sustainability**

Flow chemistry is becoming increasingly established in both academic and industrial laboratories, where it is progressively integrating into existing synthetic practices. This article presents the principles of this approach and discusses its advantages over conventional batch processes, particularly with respect to reaction control, safety, and reproducibility. This analysis leads us to examine the categories of transformations that benefit most from continuous processing and to outline their specific advantages. We will then highlight the eco-compatibility of transformations performed under flow conditions, with a particular focus on those combining heterogeneous (photo)catalysis with atom-economical strategies – an advantageous combination that encourages a rethinking of organic synthesis in response to environmental challenges.

Keywords **Organic synthesis, continuous flow, heterogeneous catalysis, atom economy.**

https://doi.org/10.63133/scf.act-chim.2026.519.04

La chimie en flux continu en synthèse organique

La synthèse organique est une discipline fondamentale qui permet de créer des molécules à haute valeur ajoutée à partir de fragments plus simples, issus de source renouvelable (biomasse) ou fossile (pétrochimie). Construire des molécules complexes trouve son intérêt dans de nombreux domaines et, tout particulièrement, dans la recherche et le développement de nouvelles substances bioactives comme en chimie médicinale ou en agrochimie [1]. Il est curieux de constater que, malgré les avancées technologiques de ces dernières décennies et le développement de méthodologies de synthèse de plus en plus élaborées, la synthèse organique exploite à peu de choses près les mêmes équipements que ceux utilisés au siècle dernier. À ce propos, tout chimiste de synthèse est familier avec la procédure traditionnelle, dite *batch*, où les réactifs et solvants sont introduits « à la main » dans un ballon à fond rond contenant un barreau aimanté pour réaliser le mélange (étape 1). Le milieu réactionnel est agité à la température désirée pendant une durée donnée (étape 2), puis traité par une phase aqueuse (étape 3) et transféré dans une ampoule à décanter où seront réalisés les différents lavages et extractions. Le solvant est alors évaporé afin d'obtenir un produit presque pur appelé *brut* (étape 4). Enfin, une dernière étape de purification par colonne chromatographie sur gel de silice (ou parfois seulement une recristallisation) vient compléter le processus (étape 5), pour obtenir *in fine* le produit de la réaction. Toutes ces étapes, parfaitement maîtrisées par les chimistes organiciens, constituent le mode opératoire traditionnel mis au point depuis des siècles pour produire des composés chimiques de toutes sortes (*figure 1a*).

La chimie en flux continu vise à substituer ce protocole bien établi en intégrant les différentes étapes séquentielles discontinues au sein d'un procédé unique et continu [2]. Les réactifs ne sont plus introduits manuellement, mais employés sous forme de solutions mères (réservoirs) acheminées vers le réacteur au moyen de pompes – pousse-seringues, péristaltiques ou à piston (étape 1). Cette organisation impose la dissolution complète des composés dans le solvant réactionnel, paramètre déterminant pour la mise en œuvre en flux. Elle permet également d'envisager certaines synthèses de chimie fine difficiles voire impossibles à réaliser en réacteur batch conventionnel. En amont du réacteur, les différents flux se rejoignent au sein de mélangeurs (en T ou en Y), qui remplacent le barreau aimanté traditionnel et assurent une homogénéisation rapide et contrôlée. Dans ce contexte, la sélectivité des réactions organiques ne dépend pas uniquement de la transformation chimique elle-même, mais également du système réactionnel et des modalités de mélange, sensiblement différentes de celles observées en discontinu.

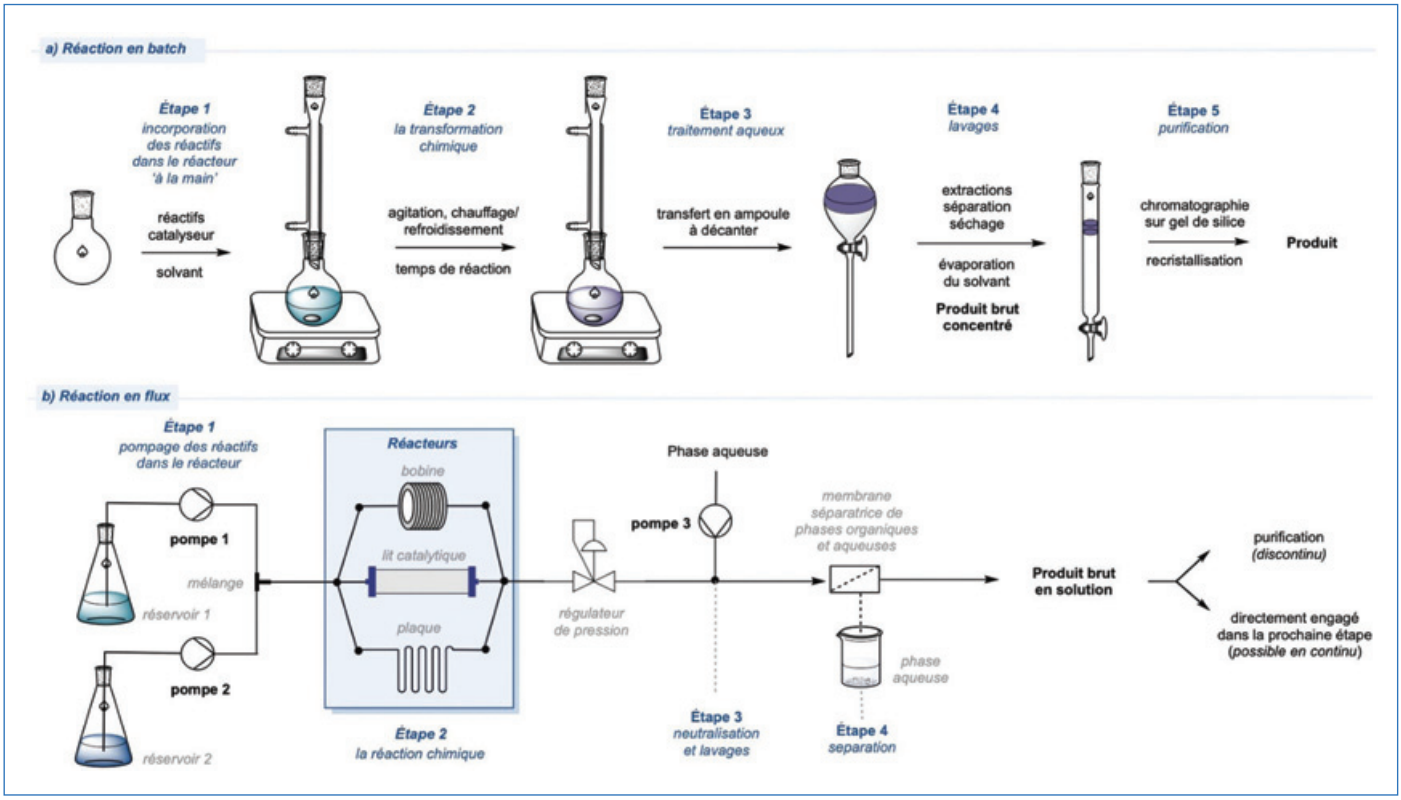


Figure 1 - Méthodes de synthèse : a) en batch et b) en flux.

Par ailleurs, le cisaillement généré par l'écoulement peut, dans certains cas, permettre de s'affranchir de l'usage de solvants, en réduisant la viscosité apparente du milieu et en facilitant les transferts. Le mélange est ensuite dirigé vers un réacteur dont la configuration varie selon la transformation envisagée : tubulaire (bobine), à lit fixe ou à plaques (puce microfluidique) (étape 2). La pression y est aisément maîtrisée par l'installation d'un régulateur de contre-pression (« *back-pressure regulator* ») en sortie. Enfin, les étapes de traitement peuvent être intégrées de manière continue (étape 3). L'addition d'une phase aqueuse suivie d'un module de séparation muni d'une membrane semi-perméable permet, par exemple, de séparer en continu les espèces hydrophiles et hydrophobes. La solution obtenue, contenant le produit brut, peut être directement engagée dans une étape ultérieure télescopée ou purifiée si nécessaire (par chromatographie sur silice, par exemple). Il faut toutefois souligner que la chromatographie sur gel de silice ne constitue pas un procédé strictement continu, la phase stationnaire devant être remplacée lorsqu'elle est saturée, ce qui impose une interruption partielle du système. Une synthèse continue au sens strict doit donc idéalement s'affranchir de cette étape de purification (*figure 1b*). Il convient néanmoins de noter que certaines opérations de purification, telles que la recristallisation, peuvent être mises en œuvre de manière continue [3].

Influence du flux continu sur les paramètres réactionnels et avantages associés

La comparaison directe entre la chimie en batch et la chimie en flux demeure délicate, dans la mesure où il est pratiquement impossible de reproduire à l'identique les conditions réactionnelles propres à chacun de ces modes opératoires. Il importe néanmoins de souligner que le mécanisme réactionnel demeure identique, indépendamment de la technique

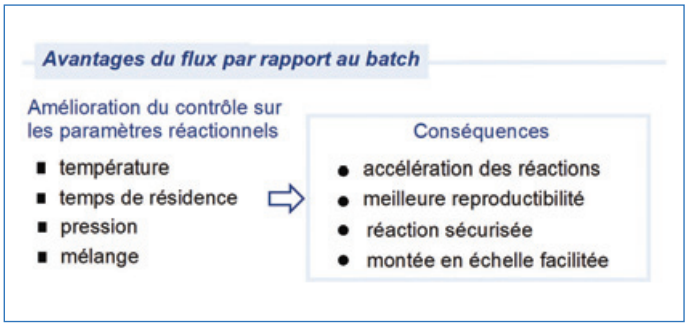


Figure 2 - Avantages de la chimie en flux.

utilisée. La chimie en flux continu bénéficie de l'automatisation des procédés, ce qui permet un contrôle nettement renforcé des paramètres réactionnels clés gouvernant la transformation chimique. Il en résulte généralement une amélioration des rendements ainsi qu'une réduction significative des temps de réaction (*figure 2*).

Le temps de résidence

À ce propos, un premier paramètre important à considérer est le temps de résidence (ou temps de séjour), c'est-à-dire la durée pendant laquelle les réactifs restent dans la zone réactionnelle. Contrairement aux procédés batch où le temps de réaction dépend du moment où l'on mélange les réactifs à une température donnée, en flux, il est déterminé par le débit d'écoulement et le volume du réacteur. Cela permet de fixer exactement combien de temps les molécules passent dans des conditions données, ce qui réduit les risques de surchauffe, de dégradations ou de réactions secondaires. Ce contrôle précis est particulièrement utile pour des réactions rapides (aussi appelées « *flash chemistry* » [4]) comme les réactions d'échange halogène-métal, et garantit une meilleure reproductibilité d'un essai à l'autre.

La température

L'un des atouts majeurs de la chimie en flux réside dans sa capacité à contrôler très précisément la température des transformations. Cela s'explique par la géométrie particulière des réacteurs en flux, souvent en forme de tubes étroits ou de microcanaux, qui offrent un rapport surface/volume très élevé. Cette configuration permet un échange thermique rapide et efficace entre le fluide réactionnel et l'extérieur du réacteur. Contrairement aux réacteurs batch, où la chaleur peut être difficile à dissiper en raison du grand volume et d'un mélange parfois imparfait, les réacteurs en flux assurent une température homogène et stable sur toute la longueur du système. Il devient ainsi possible de chauffer ou de refroidir instantanément, de minimiser les gradients thermiques, et de maintenir les conditions optimales pour la réaction. Ce contrôle thermique précis améliore non seulement la sécurité, notamment lors de réactions exothermiques ou sensibles, mais aussi la reproductibilité et la qualité des produits obtenus.

La pression

Comme les autres paramètres susmentionnés, le contrôle de la pression est également plus aisé en flux continu. Les réacteurs en flux, souvent ouverts et de faible volume, peuvent facilement fonctionner sous pression élevée – de quelques bars à plusieurs centaines – grâce à des pompes et à des régulateurs de contre-pression. Cela permet non seulement d'atteindre des températures supérieures à la température d'ébullition ordinaire (à pression atmosphérique) des solvants (en utilisant l'effet de pression pour les maintenir liquides, « *superheating chemistry* » [5]), mais aussi d'améliorer la solubilité des gaz dans les liquides, de favoriser certaines réactions ou d'augmenter la vitesse réactionnelle. Dans un système batch, maintenir une pression constante est plus complexe, surtout à grande échelle, et nécessite des dispositifs lourds ou coûteux.

Le mélange

Bien que de nombreuses réactions chimiques puissent être menées en l'absence d'agitation – point qui demeure d'ailleurs l'objet de discussions au sein de la communauté [6] –, la négligence des phénomènes de mélange peut compromettre la reproductibilité des résultats. En mode batch, la maîtrise du mélange constitue fréquemment une difficulté, en particulier pour les transformations rapides ou sensibles, dans la mesure où elle repose sur une agitation magnétique ou mécanique susceptible de générer des gradients de concentration. À l'inverse, le mode flux continu offre généralement un mélange nettement plus efficace : les réactifs y sont introduits simultanément au sein de micro-mélangeurs assurant un brassage quasi instantané à l'échelle moléculaire. Il en découle une homogénéité accrue des conditions initiales, paramètre essentiel pour garantir une réaction propre et rigoureusement contrôlée dès les premiers instants. Cette maîtrise renforcée permet, dans de nombreux cas, d'accélérer les transformations tout en limitant – voire en évitant – la formation de sous-produits et d'améliorer la reproductibilité.

Transposition

L'un des défis classiques de la chimie en batch est la transposition d'une réaction du laboratoire à l'échelle industrielle. Cette montée en échelle nécessite souvent de revalider tous les paramètres de sécurité, de mélange, de transfert thermique ou de cinétique. En chimie en flux, le passage à l'échelle peut se faire selon deux approches. La première est de simplement prolonger le temps de fonctionnement ou de multiplier les unités en parallèle, ce qui rend la montée en échelle plus rapide, plus fiable et moins coûteuse. Bien évidemment, cette approche est limitée par la quantité que peut produire un réacteur en flux à l'échelle du laboratoire, qui n'excède généralement pas le gramme par heure. Une deuxième approche consiste donc à augmenter les volumes des réacteurs en flux, ce qui implique généralement une ré-optimisation du procédé qui peut être coûteuse. Cependant, certaines entreprises spécialisées proposent des réacteurs continus de différents calibres dont les paramètres sont directement transposables pour faciliter la montée en échelle.

Sécurité

La chimie en flux continu présente des avantages considérables en matière de sécurité, notamment pour la manipulation de substances dangereuses, instables ou fortement exothermiques. Contrairement aux systèmes batch, dans lesquels de grandes quantités de réactifs sont traitées simultanément, les réacteurs en flux fonctionnent avec des volumes très réduits à tout instant. Cela limite drastiquement les risques d'emballement thermique, d'explosion ou d'exposition accidentelle. De plus, le confinement du système, l'absence d'ouverture fréquente et la possibilité de travailler sous pression contrôlée réduisent l'exposition de l'opérateur et facilitent l'intégration de barrières de sécurité. Ce niveau de maîtrise permet d'envisager des transformations autrefois jugées trop dangereuses pour être utilisées en production industrielle [7].

Espace

Un autre avantage majeur de la chimie en flux continu réside dans la réduction significative de l'encombrement des installations par rapport aux procédés batch, en particulier à l'échelle industrielle. Les réactions se déroulent en effet dans des réacteurs de faible volume, typiquement compris entre quelques microlitres et quelques millilitres, contrastant avec les réacteurs batch dont le volume est beaucoup plus important pour des quantités équivalentes de réactifs. L'élimination de l'agitation mécanique ou magnétique contribue également à un gain d'espace considérable, tandis que les dispositifs de chauffage et de refroidissement sont miniaturisés et directement intégrés aux réacteurs, contrairement aux bains ou enveloppes de grande taille nécessaires en batch. Par ailleurs, les étapes traditionnellement réalisées hors ligne, telles que les extractions, les lavages ou d'autres opérations de purification, peuvent être directement intégrées dans la ligne de flux. Cette intégration réduit le recours à la verrerie volumineuse et aux dispositifs auxiliaires, simplifiant ainsi l'installation et optimisant l'espace global disponible. Pour quantifier la production par rapport au volume de réacteur, les chimistes utilisent couramment un indicateur appelé rendement espace-temps (« *space-time yield* »). Il permet d'évaluer la faisabilité d'un procédé à l'échelle industrielle : plus ce rendement est élevé, plus le procédé est efficace en termes de production par unité de volume et par unité de temps, ce qui a un impact direct sur les coûts et l'espace nécessaire pour l'installation [8].

Optimisation, analyses en ligne et intelligence artificielle

La chimie en flux est particulièrement bien adaptée à l'automatisation et à l'optimisation en temps réel. Grâce à l'intégration de capteurs en ligne (spectroscopie IR, UV, RMN, mesures

de pression ou de débit), il est possible de suivre l'évolution de la transformation en direct, sans interrompre le processus. Ces données peuvent ensuite alimenter des boucles de rétroaction qui ajustent automatiquement les paramètres opératoires – température, débit, concentration – pour obtenir des performances optimales. Ce système de contrôle dynamique ouvre la voie à l'utilisation d'algorithmes d'optimisation, voire à des modèles d'intelligence artificielle capables d'explorer un espace de conditions réactionnelles et de proposer en temps réel les meilleures combinaisons [9]. En comparaison, la chimie en batch nécessite de multiples essais successifs pour tester différents paramètres, ce qui est long et coûteux. Ainsi, la chimie en flux permet une optimisation accélérée et souvent beaucoup plus efficace des réactions chimiques.

Les différentes méthodes de synthèse en flux continu

Les systèmes de chimie en flux continu peuvent être classés en quatre grandes catégories (*figure 3*) [10].

Le cas le plus simple, dit **type I**, consiste à faire circuler l'ensemble des réactifs (A et B) de manière continue à travers le réacteur, tandis que le produit est collecté en sortie également de façon continue. Bien que cette approche permette une production continue, elle présente un inconvénient majeur : les réactifs non consommés et les sous-produits sont entraînés avec le produit, induisant une contamination qui nécessite des étapes de purification supplémentaires.

Pour limiter ces opérations en aval, une solution consiste à utiliser des réactifs supportés, immobilisés sur un matériau solide à l'intérieur du réacteur, selon le **type II** [11]. Lorsqu'un des réactifs est fixé sur un support et utilisé en excès, il est possible de limiter la présence de réactifs résiduels dans l'effluent, ce qui simplifie la purification. Toutefois, cette approche présente certaines limites : le réactif immobilisé finit par s'épuiser, ce qui impose l'arrêt du processus pour remplacer le réacteur, interrompant ainsi la continuité du flux. Des réactions secondaires, dues à un excès de réactif, peuvent également survenir.

La catalyse constituant un pilier fondamental de la chimie organique moderne, un grand nombre de réactions mises en œuvre en flux continu font appel à des catalyseurs homogènes, dissous dans la phase mobile (**type III**) [12]. Dans ce contexte, la photocatalyse homogène tire un bénéfice tout particulier de son application en flux, l'efficacité d'irradiation élevée des réacteurs tubulaires conduisant à une accélération significative des transformations photocatalysées. À titre illustratif, des réactions requérant plus de douze heures d'irradiation en batch peuvent généralement être réalisées avec des temps de résidence de l'ordre de quelques minutes en flux continu, ce qui constitue un avantage considérable [13]. Néanmoins, malgré des niveaux élevés d'efficacité et de sélectivité, ce type de procédé présente une limitation majeure : la contamination du produit final par le catalyseur homogène, dont l'élimination complique les étapes de purification. En outre, ces catalyseurs font rarement l'objet de stratégies de recyclage, ce qui se traduit par une augmentation significative des coûts et par un impact environnemental défavorable. Cette problématique est d'autant plus critique en photocatalyse que les systèmes catalytiques employés reposent majoritairement sur des complexes de ruthénium ou d'iridium, métaux rares et particulièrement onéreux [14]. Par ailleurs, la présence résiduelle de ces métaux pose des risques toxicologiques (notamment dans des composés bioactifs) et impose l'élimination rigoureuse de toute trace métallique.

Pour surmonter cette difficulté, le recours à des catalyseurs hétérogènes, incorporés dans des réacteurs à lit fixe (**type IV**), s'avère particulièrement avantageux [15]. Ce mode de fonctionnement permet d'éliminer toute étape de séparation du catalyseur en aval (celui-ci étant automatiquement réutilisé au sein du réacteur), tout en améliorant la cinétique de réaction. En effet, l'interaction entre le substrat circulant et le catalyseur fixé est favorisée par une concentration locale plus élevée et une fréquence de contact accrue. Ces caractéristiques font du type IV l'une des approches les plus prometteuses pour la synthèse en flux continu. L'efficacité de ce type de système repose toutefois sur une conception rigoureuse du catalyseur : la taille des particules, la surface active disponible et la dispersion du site catalytique sur le support sont autant de paramètres cruciaux. Le développement et l'optimisation de catalyseurs hétérogènes adaptés sont donc essentiels pour tirer pleinement parti des réacteurs en flux de type IV.

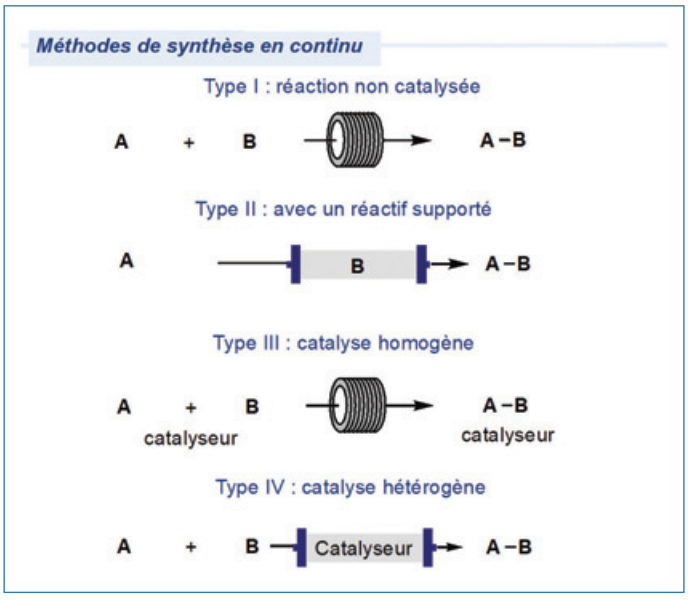


Figure 3 - Types de réactions applicables en flux continu.

Flux continu, catalyse hétérogène et économie d'atomes : vers une synthèse « idéale et durable » ?

La catalyse hétérogène constitue donc un levier majeur pour la mise en œuvre de procédés en flux répondant aux exigences contemporaines de durabilité. En particulier, son intégration dans des systèmes continus permet de télescoper aisément plusieurs étapes réactionnelles en connectant la sortie d'un réacteur à lit fixe à des modules subséquents, rendant possible la synthèse multi-étapes en continu de composés à haute valeur ajoutée. Toutefois, la réalisation de telles séquences sans opérations intermédiaires de purification impose de limiter la formation de déchets indésirables. À cet égard, les réactions de substitution, intrinsèquement génératrices de déchets, s'avèrent moins propices aux enchaînements télescopés. À l'inverse, les réactions d'addition, d'isomérisation, les réarrangements sigmatropiques ou encore les réactions multicomposants constituent des alternatives privilégiées, car elles présentent une meilleure économie d'atomes (c'est-à-dire qu'une proportion élevée des atomes des réactifs est incorporée dans le produit final) et s'inscrivent ainsi plus

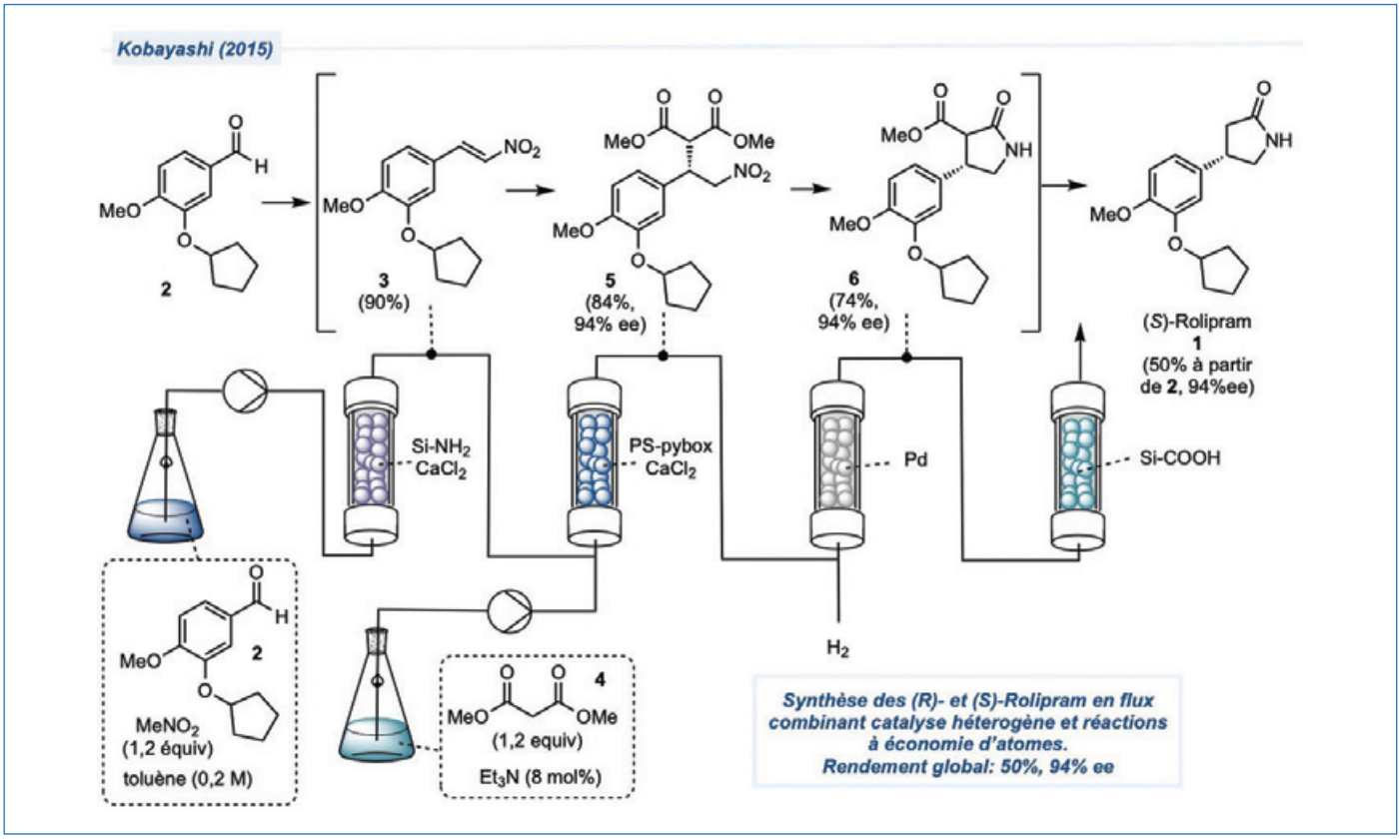


Figure 4 - Synthèse du rolipram en flux.

efficacement dans une démarche de réduction des déchets. La combinaison de la catalyse hétérogène en flux avec des transformations atome-économes ouvre dès lors un accès particulièrement efficace à des synthèses idéales de cibles moléculaires complexes [16].

Synthèse du rolipram

Cette approche a été exploitée de manière exemplaire par l'équipe de S. Kobayashi dans la synthèse asymétrique des (*R*)- et (*S*)-rolipram (**1**), molécules connues pour leurs propriétés anti-inflammatoires (*figure 4*) [17]. La séquence débute par une réaction de Henry entre l'aldéhyde **2** et le nitrométhane, suivie d'une déshydratation conduisant au nitroalcène **3**. Cette transformation a été réalisée en flux continu avec un catalyseur basique hétérogène constitué de silice fonctionnalisée par des groupes amino (Si–NH_2), en présence de $CaCl_2$ jouant le rôle d'agent déshydratant. L'intermédiaire **3** a été obtenu avec des rendements supérieurs à 90 %. Le flux contenant **3** a été directement combiné avec une solution de diméthylmalonate **4** et de triéthylamine, puis envoyé dans une colonne garnie d'un catalyseur chiral supporté sur polystyrène (PS-(*S* ou *R*)-pybox-$CaCl_2$). Cette étape a permis la réalisation d'une addition 1,4 énantiosélective menant au γ-nitroester **5** avec un rendement de 84 % et un excès énantiomérique (ee) de 94 %, démontrant l'efficacité d'une catalyse asymétrique totalement hétérogène en flux. Le γ-nitroester **5** a ensuite été soumis à une hydrogénation en présence de Pd et de H_2 conduisant à l'amine correspondante, laquelle s'est cyclisée spontanément pour former le γ-lactame **6** (74 % de rendement, 94 % ee). Enfin, l'hydrolyse et la décarboxylation de **6** ont été réalisées dans une colonne contenant de la silice fonctionnalisée par des groupes carboxyle (Si–COOH) chauffée à 120 °C, conduisant au (*S* ou *R*)-rolipram avec un rendement global de 50 %. De manière remarquable, l'ensemble du dispositif a opéré de façon continue pendant plus d'une semaine, permettant la production d'environ 1 g par jour de (*S* ou *R*)-rolipram. À ce jour, cette étude représente l'un des exemples les plus aboutis de synthèse multi-étapes en flux continu reposant exclusivement sur de la catalyse hétérogène couplée à des transformations à haute économie d'atomes.

Synthèse du donépézil

Dans cette lignée, l'équipe de S. Kobayashi a également démontré la puissance de cette approche en développant une synthèse en flux continu du donépézil (**7**), un agent thérapeutique utilisé dans le traitement des symptômes de démence associés à la maladie d'Alzheimer (*figure 5*) [18]. La séquence débute par une condensation aldolique entre l'indanone **8** et l'aldéhyde **9**, réalisée à l'aide d'une résine basique échangeuse d'ions (Amberlyst A26) employée ici comme catalyseur hétérogène. Pour ce faire, une solution contenant un mélange quasi-stœchiométrique des deux réactifs a été pompée à 55 °C à travers une colonne remplie de A26, permettant la formation en continu de la cétone α,β-insaturée **10** avec d'excellents rendements (92-95 %). L'influence du solvant sur la stabilité opérationnelle de cette étape est particulièrement marquante. En effet, l'utilisation du THF pur conduit à une désactivation rapide du catalyseur, se traduisant par une chute drastique du rendement après quelques heures de fonctionnement. À l'inverse, l'emploi d'un mélange de THF, d'isopropanol et de quelques pourcents d'eau (2 %) permet non seulement d'atteindre des rendements plus élevés plus rapidement (95 % après 1 h d'opération), mais assure également une stabilité remarquable du système, la production pouvant être maintenue pendant plus d'une semaine sans perte significative d'activité catalytique. Cette robustesse a permis de télescoper directement la sortie de la colonne vers un second module catalytique contenant du palladium

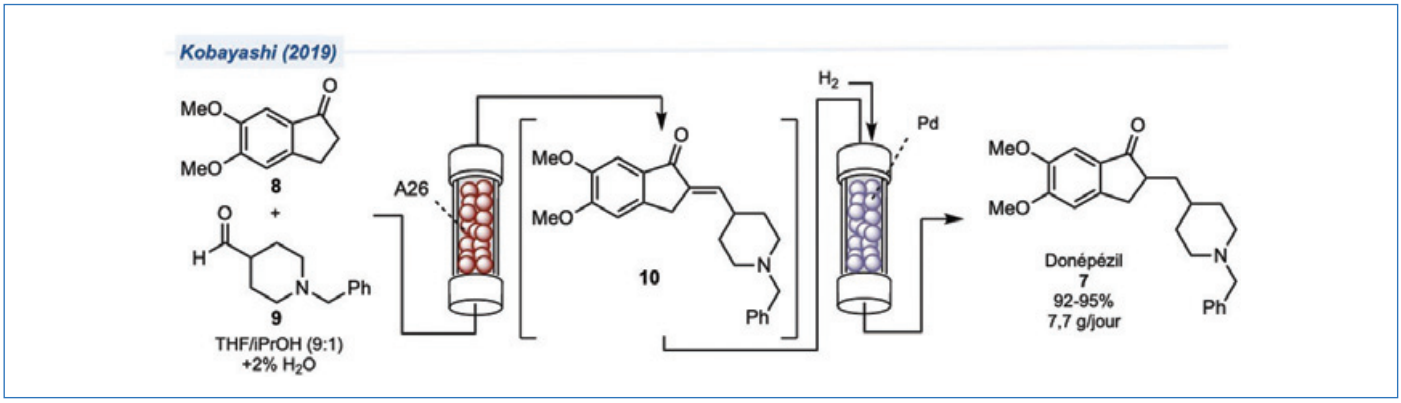


Figure 5 - Synthèse en flux du donépézil.

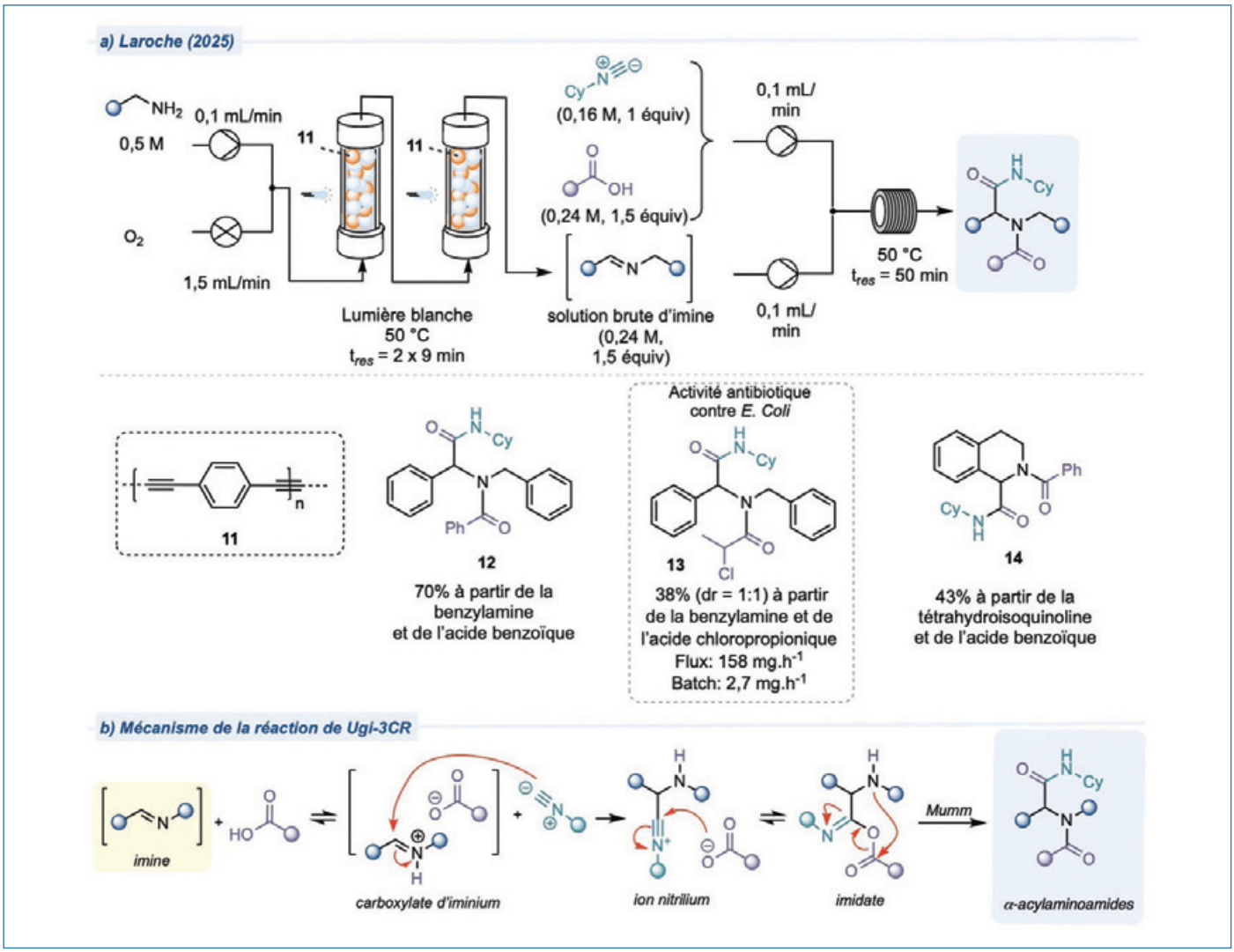


Figure 6 - Synthèse d'α-acylaminoamides en flux.

sous atmosphère d'hydrogène, afin d'effectuer la réduction sélective de la double liaison. Le donépézil **7** a ainsi été obtenu en continu avec des rendements globaux compris entre 92 et 95 %. De manière notable, cette stratégie a permis d'atteindre une productivité d'environ 7,7 g par jour, sans génération significative de déchets chimiques.

Synthèse d'α-acylamino-amides

Notre équipe a récemment mis en œuvre cette approche combinant flux continu, catalyse hétérogène et économie d'atomes en utilisant cette fois un photocatalyseur à l'état solide [19]. Nous avons ainsi pu accéder à une série d'α-acylamino-amides, composés d'intérêt en raison de leurs propriétés peptidomimétiques (*figure 6a*). Dans un premier temps, nous avons effectué la synthèse d'imines en flux continu par oxydation photocatalytique d'amines en présence de dioxygène. Cette transformation repose sur l'utilisation d'un photocatalyseur polymère π-conjugué, le poly(*para*-phénylène-éthynylène) **11**, dont les propriétés semi-conductrices remarquables et le fort pouvoir oxydant sous irradiation lumineuse en font un photocatalyseur hétérogène particulièrement adapté à une intégration en réacteur à lit fixe. L'incorporation

de ce photocatalyseur au sein d'un dispositif en flux a permis d'obtenir un large ensemble d'imines avec d'excellents rendements. L'avantage du mode continu apparaît clairement : les réactions atteignent une conversion complète en 9 à 18 minutes de temps de résidence, alors que les conditions équivalentes en batch requièrent typiquement plus de 19 heures d'irradiation. Par ailleurs, l'utilisation du dioxygène comme oxydant « sans trace » conduit à des solutions d'imines brutes d'excellente qualité, compatibles avec un télescopage direct. Ainsi, les solutions obtenues ont pu être directement introduites dans un deuxième module en flux constitué d'une bobine chauffée à 50 °C, alimentée par un second réservoir contenant un acide carboxylique et un isonitrile, afin de réaliser une réaction multicomposant de type Ugi (mécanisme détaillé en *figure 6b*). À la sortie de ce module, plusieurs α-acylamino-amides (**12**-**14**) ont été isolés avec des rendements bons à modérés et une productivité systématiquement supérieure à celle obtenue en conditions batch. En particulier le produit **13**, connu pour son activité antibiotique contre *E. Coli* [20], a été obtenu avec une productivité plus de cinquante fois supérieure en flux qu'en batch.

Perspectives d'évolution de la synthèse organique

La chimie en flux continu s'impose aujourd'hui comme un outil central pour repenser la manière dont les synthèses organiques sont conçues, optimisées et mises en œuvre [21]. En offrant des procédés plus efficaces, reproductibles, sûrs et aisément transposables à l'échelle industrielle, elle constitue un cadre privilégié pour le développement de stratégies de synthèse en adéquation avec les exigences croissantes de durabilité. Néanmoins, la durabilité intrinsèque de la chimie en flux ne peut être dissociée des choix stratégiques effectués lors de la conception des voies de synthèse. À plus long terme, une évolution profonde de la synthèse organique pourrait résider dans l'intégration systématique de critères environnementaux dès les premières étapes de la planification rétrosynthétique. Dans cette optique, les transformations génératrices de déchets chimiques inutiles pourraient être progressivement écartées au profit de réactions intrinsèquement atome-économes. Une telle démarche impliquerait une redéfinition des logiques de construction moléculaire et marquerait un changement de paradigme dans la conception des synthèses multi-étapes. Cependant, la mise en œuvre de ces stratégies « idéales » demeure conditionnée par des avancées méthodologiques majeures. En particulier, le développement de la catalyse hétérogène, encore largement sous-exploitée en synthèse organique, représente un enjeu majeur. Les progrès futurs dépendront d'efforts concertés en conception rationnelle de catalyseurs, en caractérisation avancée des systèmes catalytiques et en intégration de compétences issues de disciplines connexes. À terme, cette convergence pourrait permettre l'émergence de nouvelles plateformes de synthèse, conciliant efficacité, durabilité et innovation, et redéfinir en profondeur les pratiques de la synthèse organique moderne.

[1] K. C. Nicolaou, E. J. Sorensen, N. Winssinger, The Art and Science of Organic and Natural Products Synthesis, *J. Chem. Educ.*, **1998**, *75*, p. 1225-58, https://doi.org/10.1021/ed075p1225

[2] S. E. Raby-Buck, *et al.*, Continuous Flow Chemistry for Molecular Synthesis, *Nat. Rev. Methods Primers*, **2025**, *5*, 44, https://doi.org/10.1038/s43586-025-00414-x

[3] M. Jiang, R. D. Braatz, Designs of continuous-flow pharmaceutical crystallizers: developments and practice, *CrystEngComm*, 2019, *21*, p. 3534-51, https://doi.org/10.1039/c8ce00042e

[4] a) J.-I. Yoshida, Y. Takahashi, A. Nagaki, Flash Chemistry: Flow Chemistry That Cannot Be Done in Batch, *Chem. Commun.*, **2013**, *49*, p. 9896-904, https://doi.org/10.1039/C3CC44709J ; b) B. Picard, J. Legros, Chimie Éclair – Synthèse Microfluidique Ultra-Rapide, *Techniques de l'ingénieur* **2019**, fiche J8025.

[5] P. Bianchi, J.-C. M. Monbaliu, New Opportunities for Organic Synthesis with Superheated Flow Chemistry, *Acc. Chem. Res.*, **2024**, *57*, p. 2207-18, https://doi.org/10.1021/acs.accounts.4c00340

[6] J. H. A. Schuurmans, S. D. A. Zondag, A. Chaudhuri, J. van der Schaaf, T. Noël, Stirring the Debate: How Mixing Influences Reproducibility and Efficiency in Synthetic Organic Chemistry, *ACS Cent. Sci.*, **2026**, *12*, p. 7-13, https://doi.org/10.1021/acscentsci.5c01825

[7] M. Movsisyan *et al.*, Taming Hazardous Chemistry by Continuous-Flow Technology, *Chem. Soc. Rev.*, **2016**, *45*, p. 4892-928, https://doi.org/10.1039/C5CS00902B

[8] C. A. Hone, C. O. Kappe, Towards the Standardization of Flow Chemistry Protocols for Organic Reactions, *Chem. Methods*, **2021**, *1*, p. 454-67, https://doi.org/10.1002/cmtd.202100059

[9] A. Slattery *et al.*, Automated Self-Optimization, Intensification, and Scale-Up of Photocatalysis in Flow, *Science*, **2024**, *383*, p. 1-12, https://doi.org/10.1126/science.adj1817

[10] S. Kobayashi, Flow "Fine" Synthesis: High Yielding and Selective Organic Synthesis by Flow Methods, *Chem. Asian J.*, **2016**, *11*, p. 425-36, https://doi.org/10.1002/asia.201500916

[11] P. Hodge, Synthesis of Organic Compounds Using Polymer-Supported Reagents, Catalysts, and/or Scavengers in Benchtop Flow Systems, *Ind. Eng. Chem. Res.*, **2005**, *44*, p. 8542-53, https://doi.org/10.1021/ie040285e

[12] L. F. Peña, L. G. Parte, C. Díez-Poza, J. Guerra, E. López, Homogeneous Catalysis in Continuous Flow Integrating Photocatalysis, Electrocatalysis, and Automation Technologies, *Commun. Chem.*, **2025**, *8*, 336, https://doi.org/10.1038/s42004-025-01725-6

[13] Y. Su, N. J. W. Straathof, V. Hessel, T. Noël, Photochemical Transformations Accelerated in Continuous-Flow Reactors: Basic Concepts and Applications, *Chem. Eur. J.*, **2014**, *20*, p. 10562-89, https://doi.org/10.1002/chem.201400283

[14] C. K. Prier, D. A. Rankic, D. W. C. MacMillan, Visible Light Photoredox Catalysis with Transition Metal Complexes: Applications in Organic Synthesis, *Chem. Rev.*, **2023**, *113*, p. 5322-63, https://doi.org/10.1021/cr300503r

[15] K. Masuda, T. Ichitsuka, N. Koumura, K. Sato, S. Kobayashi, Flow Fine Synthesis With Heterogeneous Catalysts, *Tetrahedron*, **2018**, *75*, p. 1705-30, https://doi.org/10.1016/j.tet.2018.02.006

[16] W.-J. Yoo, H. Ishitani, Y. Saito, B. Laroche, S. Kobayashi, Reworking Organic Synthesis for the Modern Age: Synthetic Strategies Based on Continuous-Flow Addition and Condensation Reactions with Heterogeneous Catalysts, *J. Org. Chem.*, **2020**, *85*, p. 5132-45, https://doi.org/10.1021/acs.joc/9b03416

[17] T. Tsubogo, H. Oyamada, S. Kobayashi, Multistep Continuous-Flow Synthesis of (*R*)- and (*S*)-Rolipram using Heterogeneous Catalysts, *Nature*, **2015**, *520*, p. 329-32, https://doi.org/10.1038/nature14243

[18] B. Laroche, Y. Saito, H. Ishitani, S. Kobayashi, Basic Anion-Exchange Resin-Catalyzed Aldol Condensation of Aromatic Ketones with Aldehydes in Continuous Flow, *Org. Process Res. Dev.*, **2019**, *23*, p. 961-67, https://doi.org/10.1021/acs.oprd.9b00048

[19] B. Weyl *et al.*, Visible Light Excitation of Poly-(*para*-Phenylene Ethynylene) Enables Heterogeneous Photocatalytic Oxidations of Amines in Flow, *Angew. Chem. Int. Ed.*, **2025**, *64*, e202419169, https://doi.org/10.1002/anie.202419169

[20] P. Sahrawat *et al.*, Influence of Open Chain and Cyclic Structure of Peptidomimetics on Antibacterial Activity in *E. Coli* Strains, *Molecules*, **2022**, *27*, 3633, https://doi.org/10.3390/molecules27113633

[21] Précédents articles parus dans *L'Actualité Chimique* sur ce sujet (à retrouver sur www.lactualitechimique.org) : a) J. Legros, Synthèse organique en réacteurs miniaturisés en flux continu, *L'Act. Chim.*, **2021**, *467*, p. 7-13 ; b) M. Lancel, C. Gomez, M. Port, Z. Amara, Des photocatalyseurs immobilisés pour des réactions en flux continu, *L'Act. Chim.*, **2023**, *488*, p. 7-16.

Échange isotopique hydrogène/deutérium

Quand la catalyse hétérobimétallique redéfinit le marquage isotopique

Clément CAMP

Laboratoire de Catalyse, Polymérisation, Procédés et Matériaux (CP2M), CNRS – Université Claude Bernard – CPE-Lyon.
✉ clement.camp@univ-lyon1.fr

Résumé Le marquage isotopique par deutérium ou tritium est essentiel dans de nombreux domaines, notamment l'industrie pharmaceutique ou l'analyse chimique. L'échange hydrogène/deutérium (H/D) constitue une stratégie efficace de marquage isotopique tardif, permettant d'introduire ces isotopes directement sur des molécules complexes. Cependant, l'activation sélective des liaisons C–H reste difficile et les catalyseurs homogènes classiques présentent souvent des limitations en termes de sélectivité, de robustesse et de conditions opératoires. Nous avons développé une nouvelle famille de catalyseurs hétérobimétalliques associant un métal de transition « précoce » (tantale ou hafnium) et un métal « tardif » (iridium ou cobalt). Immobilisés sur silice, ces systèmes génèrent des espèces hydrure de surface très actives permettant une deutération efficace et sélective d'arènes et d'alcanes sous D_2. Des études mécanistiques montrent que l'activation C–H repose sur une coopération métal–métal qui abaisse la barrière énergétique de la réaction. Ces catalyseurs permettent notamment la perdeutération sélective du *n*-pentane et ont conduit au développement d'une stratégie tandem originale pour la synthèse efficace de tétrahydrofurane perdeutéré (THF-d_8) dans conditions douces et sans solvant. Ces résultats illustrent le potentiel de la coopération métal–métal et de la chimie organométallique de surface pour concevoir de nouveaux procédés catalytiques d'échange isotopique.

Mots-clés **Activation C-H, catalyse d'échange H/D, chimie organométallique de surface, complexes hétérobimétalliques.**

Abstract **Isotopic hydrogen/deuterium exchange: when heterobimetallic catalysis redefines isotopic labeling**
Isotopic labeling with deuterium or tritium is essential in many fields, particularly in the pharmaceutical industry and chemical analysis. Catalytic hydrogen/deuterium (H/D) exchange is an efficient late-stage isotopic labeling strategy that enables the direct incorporation of these isotopes into complex molecules. However, the selective activation of C–H bonds remains challenging, and conventional homogeneous catalysts often suffer from limitations in terms of selectivity, robustness, and operating conditions. We have developed a new family of heterobimetallic catalysts combining an "early" transition metal (tantalum or hafnium) with a "late" transition metal (iridium or cobalt). When immobilized on silica, these systems generate highly active surface hydride species that enable efficient and selective deuteration of arenes and alkanes using D_2. Mechanistic studies reveal that C–H activation proceeds through metal–metal cooperation, which lowers the reaction energy barrier. These catalysts notably enable the selective perdeuteration of *n*-pentane and have led to the development of an original tandem strategy for the efficient synthesis of perdeuterated tetrahydrofuran (THF-d_8) under mild and solvent-free conditions. These results highlight the potential of metal–metal cooperation and surface organometallic chemistry for designing new catalytic processes for isotopic exchange.

Keywords **C-H activation, H/D exchange catalysis, surface organometallic chemistry, heterobimetallic complexes.**

https://doi.org/10.63133/scf.act-chim.2026.519.06

L'hydrogène est omniprésent dans les molécules organiques : carburants, polymères, solvants, principes actifs pharmaceutiques ou agrochimiques. À l'état naturel, il est constitué presque exclusivement de l'isotope ^{1}H. Il possède toutefois deux isotopes plus lourds : le deutérium (^{2}H) et le tritium (^{3}H, radioactif). Le remplacement d'un atome d'hydrogène par l'un de ses isotopes ne modifie ni la structure électronique globale ni la connectivité d'une molécule, mais il en altère sensiblement certaines propriétés dynamiques. L'augmentation de masse influence les fréquences vibrationnelles, ce qui peut modifier les processus photophysiques (par exemple *via* un effet d'atténuation des relaxations vibrationnelles) et induit des effets isotopiques cinétiques susceptibles de ralentir certaines étapes réactionnelles. Dans un contexte biologique, ces effets peuvent impacter le métabolisme ou la stabilité d'un principe actif. Dans le cas du tritium, le marquage permet en outre un suivi radiométrique extrêmement sensible. Ces caractéristiques confèrent aux composés marqués un rôle stratégique dans plusieurs domaines :

• *Industrie pharmaceutique et agrochimique* : les molécules deutérées/tritiées servent de standards analytiques pour suivre le devenir d'un principe actif dans un organisme (biodistribution, métabolisme) ou l'environnement, par spectrométrie de masse ou par mesures de scintillation. Des principes actifs deutérés, présentant des temps de demi-vie augmentés ou des effets secondaires plus limités, sont également en train d'apparaître sur le marché.

• *Analyse chimique* : les solvants perdeutérés sont indispensables en spectroscopie RMN ^{1}H pour s'affranchir du signal parasite du solvant.

• *Industrie nucléaire* : l'échange isotopique peut par exemple contribuer à la décontamination de fluides (huiles) contenant du tritium.
• *Lutte contre la contrefaçon* : des traceurs isotopiques permettent d'identifier l'authenticité de carburants ou produits illégaux.
Mais comment introduire de manière efficace du deutérium ou du tritium au sein d'une molécule organique complexe, sans avoir à en reprendre intégralement la synthèse depuis les premières étapes ? La stratégie la plus élégante consiste à réaliser un marquage isotopique tardif, c'est-à-dire à introduire le deutérium ou le tritium en fin de synthèse, directement sur la molécule cible. Les réactions d'échange hydrogène/deutérium (H/D) répondent précisément à cet objectif. Leur principe est simple : remplacer tout ou partie des atomes d'hydrogène d'un substrat par du deutérium. Leur mise en œuvre est, en revanche, loin d'être triviale, car elle implique l'activation contrôlée de liaisons C–H parmi les plus robustes de la chimie organique. C'est ici qu'intervient la catalyse.

Catalyse métallique : des succès… mais des limites

La catalyse homogène (complexes ou nanoparticules en solution) a longtemps dominé le domaine de l'échange H/D, en particulier pour l'activation des liaisons C(sp^2)–H aromatiques. De nombreux complexes de métaux de transition ou nanoparticules métalliques permettent aujourd'hui d'atteindre de bons niveaux de deutération [1-3]. Cependant, ces systèmes présentent fréquemment une ou plusieurs limitations parmi lesquelles :
• la nécessité de groupes « orienteurs » sur la molécule cible ;
• l'emploi de conditions opératoires drastiques de température et pression, notamment pour l'activation de liaisons C(sp^3)–H ;
• la désactivation des catalyseurs conduisant à de faibles nombres de rotations (TON), et donc l'emploi de charges métalliques élevées ;
• le recours à des sources isotopiques peu pratiques telles que C_6D_6 moins attractives que D_2 en termes d'économie d'atomes et de pureté isotopique ;
• l'emploi de solvants toxiques ;
• la tolérance fonctionnelle limitée ;
• la difficulté de transposition de ces systèmes vers des procédés en réacteurs à flux continu ;
• l'utilisation de métaux précieux et de ligands organiques sophistiqués et coûteux.



Figure 1 - Deutération de cycles aromatiques par catalyse d'échange H/D avec le catalyseur de Kerr.

Par exemple, le catalyseur de Kerr [4,5] (*figure 1*), l'un des plus actifs et utilisés, est un complexe cationique d'iridium typiquement mis en œuvre dans des solvants halogénés. Il permet la deutération en position ortho par rapport à un groupement orienteur oxygéné ou azoté, ce qui réduit la diversité de substrats et le taux maximal d'incorporation isotopique au sein du produit. Face à ces contraintes, le développement de nouveaux catalyseurs à la fois actifs, sélectifs et robustes constitue ainsi un axe de recherche particulièrement dynamique.

La synergie métal–métal : nouvelles opportunités en catalyse homogène

Dans ce contexte, nous avons entrepris la conception de nouveaux catalyseurs basés sur des complexes hétérobimétalliques, associant deux métaux de transition différents au sein d'une même entité moléculaire [6-8]. L'idée consiste à combiner les propriétés complémentaires d'un métal « précoce » (comme le tantale ou l'hafnium, acides de Lewis) et d'un métal « tardif » (comme l'iridium ou l'osmium, riches en électrons). Dans une réaction modèle d'échange H/D entre le fluorobenzène et le benzène perdeutéré, certaines combinaisons (notamment hafnium–iridium, *figure 2*) se sont révélées nettement plus actives que leurs analogues monométalliques. Ce résultat met en évidence une synergie métal–métal : les deux centres coopèrent pour activer la liaison C–H [9]. Le couple tantale–iridium est également performant, tandis que l'analogue tantale–osmium reste moins actif, soulignant l'importance du choix des métaux pour optimiser la coopération catalytique [10]. Ces catalyseurs hétérobimétalliques sont robustes (stables à haute température), contrairement aux analogues monométalliques qui se décomposent pour former des nanoparticules. Cependant, ces systèmes homogènes restent contraints par des charges catalytiques élevées, une haute température (110 °C) et des temps de réaction longs

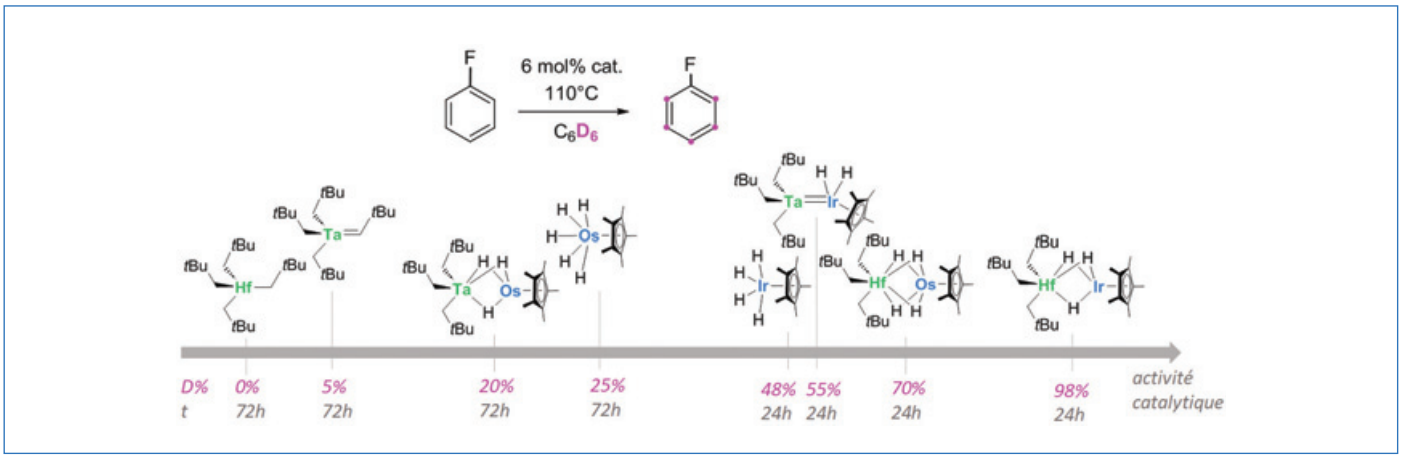


Figure 2 - Activités catalytiques comparées de divers complexes pour la deutération du fluorobenzène en phase homogène. D% : pourcentage de deutération du substrat.

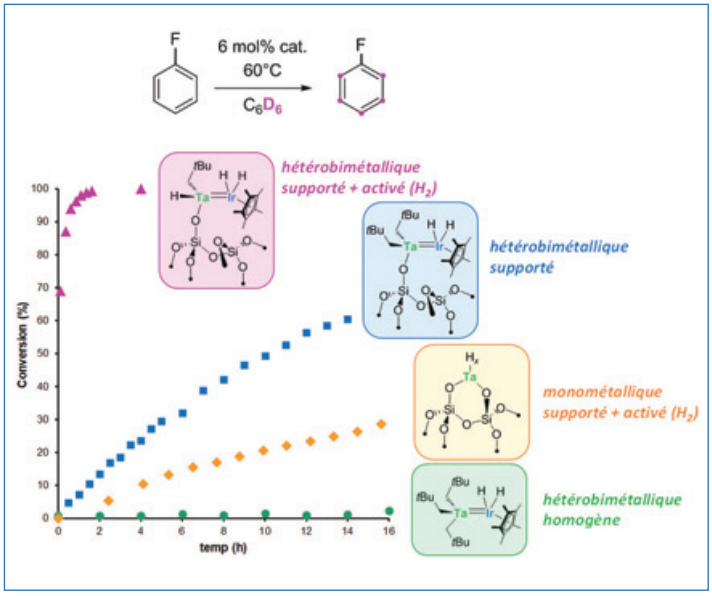


Figure 3 - Performances comparées de plusieurs catalyseurs (homogène, supporté monométallique et supporté hétérobimétalllique) dans la réaction d'échange H/D entre le fluorobenzène et C_6D_6.

pour obtenir un marquage isotopique élevé. La vraie révolution apparaît lorsque ces entités sont transposées en phase solide.

Le tournant de la catalyse hétérogène : apport de la chimie de surface

En immobilisant ces complexes hétérobimétalliques sur de la silice, les performances catalytiques ont été multipliées de plusieurs ordres de grandeur. Pourquoi un tel gain ? Le support solide ne se contente pas d'« hétérogénéiser » le catalyseur. Il participe activement à la stabilisation d'espèces métal–hydrure de surface originales, très insaturées, et inaccessible en solution. En particulier, une espèce tantale–iridium tris-hydrure, formée après activation sous dihydrogène, présente une architecture parfaitement adaptée à l'activation coopérative des liaisons C–H. Ceci conduit à des performances catalytiques spectaculaires : à charge catalytique identique, le fluorobenzène est deutéré quantitativement en quelques heures à 60 °C, alors que le système homogène n'atteignait que 55 % en 24 h à 110 °C (*figure 3*) [11]. Ce complexe tris-hydrure est non seulement plus performant que le complexe homogène, mais également supérieur à l'analogue monométallique tantale–hydrure supporté sur silice (*figure 3*), ce qui confirme une fois de plus l'intérêt des systèmes hétérobimétalliques pour l'activation des liaisons C–H. Mieux encore, ce catalyseur hétérogène se révèle à la fois robuste et hautement actif pour la deutération de cycles aromatiques en utilisant directement D_2 comme source de deutérium, à température ambiante et sans additif [11].

Comprendre le mécanisme : une activation C–H coopérative

Des études mécanistiques, appuyées par des calculs DFT [12], ont révélé un mécanisme original : l'activation de la liaison C–H se fait de manière concertée et hétérolytique sur deux centres métalliques. Le métal précoce (tantale), acide de Lewis, accepte la densité électronique de la liaison C–H, tandis que le métal tardif (iridium) contribue par rétro-donation

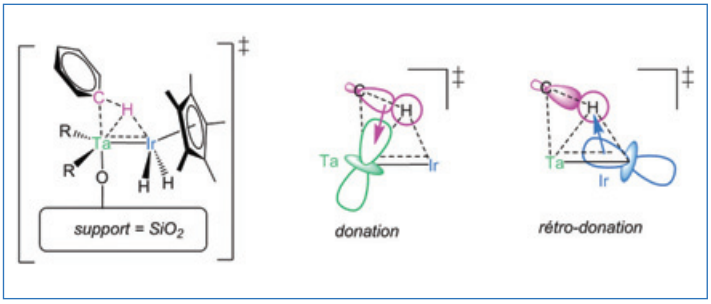


Figure 4 - (Gauche) Représentation schématique de l'état de transition d'activation C–H hétérolytique sur les deux centres métalliques. (Droite) Interactions orbitalaires au sein de l'état de transition : donation de la σ-CH dans une orbitale *d* vacante du tantale (acide de Lewis), et rétro-donation d'une orbitale π de la liaison métal–métal (principalement Ir) dans l'orbitale antiliante σ*-CH.

électronique (*figure 4*). Cette coopération abaisse fortement la barrière énergétique d'activation. Les contraintes stériques autour du cœur bimétallique apparaissent déterminantes : un faible encombrement favorise un bon recouvrement orbitalaire avec la géométrie adéquate. Ceci explique pourquoi les espèces de surface insaturées sont nettement plus actives que les complexes homogènes portant des ligands volumineux, nécessaires à la stabilisation de l'assemblage hétérobimétallique en solution, mais diminuant son accessibilité et donc sa réactivité.

Vers l'activation des alcanes : relever le défi supplémentaire de deutérer la molécule sans la casser

L'activation des liaisons C–H des alcanes, parmi les plus fortes connues, demeure encore plus difficile et nécessite des conditions de température plus sévères. Nous avons montré que la présence de sites acides de Lewis à proximité de nanoparticules d'iridium supportées sur silice joue un rôle promoteur : elle facilite l'adsorption dissociative du méthane et permet une deutération efficace de celui-ci à 250 °C [13].

Pour les alcanes plus longs, tel le pentane, un défi majeur apparaît : la deutérogénolyse, c'est-à-dire la rupture compétitive des liaisons C–C en présence de D_2. De nombreux catalyseurs favorisent en effet cette fragmentation plus facilement que l'activation des liaisons C–H, ce qui conduit à la dégradation du squelette carboné du substrat organique à marquer isotopiquement.

Contrairement aux systèmes monométalliques, le catalyseur hétérobimétallique hafnium–iridium supporté sur silice se distingue par une sélectivité exceptionnelle (*figure 5a*). Il permet la perdeutération du *n*-pentane sous D_2 de manière très efficace, sans deutérogénolyse significative (< 1 %), même à conversion élevée à 250 °C [14]. À haute température, les métaux nobles tels que l'iridium ont tendance à fritter pour conduire à la formation de nanoparticules en raison de leur faible oxophilie, et donc leur interaction limitée avec le support de silice. La présence du métal oxophile (ici l'hafnium) renforce au contraire l'adhésion entre le site actif et le support. Les analyses par microscopie électronique confirment l'absence de nanoparticules post-catalyse. Cette caractéristique est déterminante : le clivage des liaisons C–C procède généralement *via* des intermédiaires multicentres, dans lesquels un atome de carbone est lié à plusieurs sites métalliques d'iridium. La structure du catalyseur contrôle donc directement la sélectivité de la réaction.

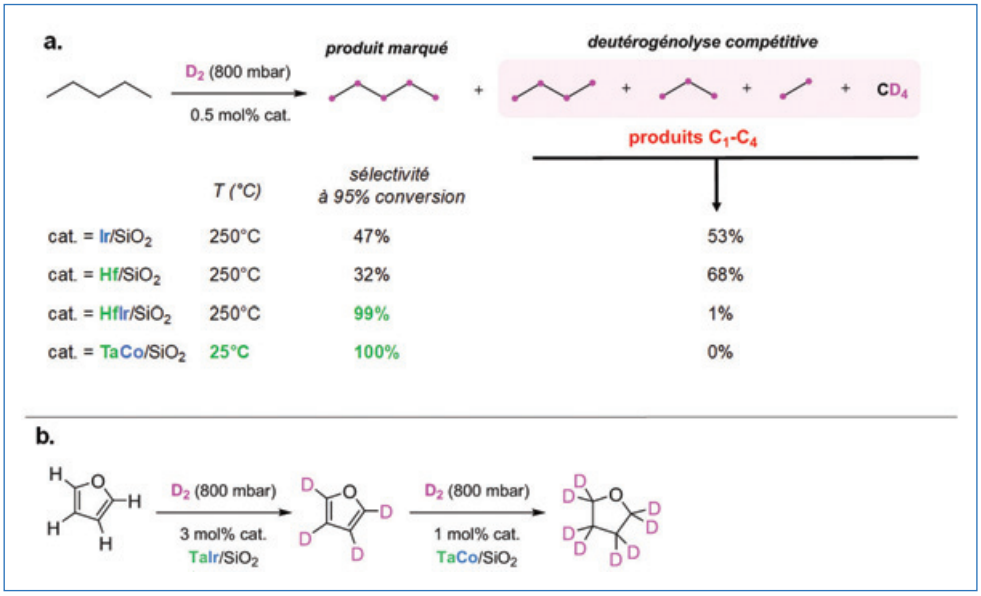


Figure 5 - (a) Performances comparées de plusieurs catalyseurs pour la deutération du pentane. (b) Perdeutération du THF reposant sur les réactivités complémentaires des catalyseurs TaIr/SiO_2 et TaCo/SiO_2.

Vers une chimie plus durable : remplacer les métaux nobles

Les catalyseurs d'échange H/D reposent souvent sur des métaux précieux (iridium). Dans une perspective de durabilité, leur remplacement par des métaux plus abondants est un objectif majeur. Nous avons ainsi développé un catalyseur tantale–cobalt supporté sur silice. Fait particulièrement remarquable, ce catalyseur a démontré une activité supérieure à celle des systèmes à base de métaux nobles, permettant la deutération du pentane à température ambiante et sous faible pression de D_2 (*figure 5a*) [15]. Bien que la stabilité thermique du catalyseur TaCo/SiO_2 soit plus limitée, il ouvre la voie à des procédés plus durables et économiquement viables.

Une avancée stratégique : produire du THF perdeutéré

Les solvants perdeutérés sont indispensables en RMN. Le THF-d_8, en particulier, est très largement utilisé, malgré son coût élevé. La deutération directe des éthers demeure toutefois difficile, ces molécules coordinantes ayant tendance à désactiver les sites actifs des catalyseurs. Pour surmonter cette limitation, nous avons exploité les sélectivités complémentaires des catalyseurs TaM/SiO_2 (M = Ir, Co). Le catalyseur TaCo/SiO_2 se révèle ainsi très performant pour la deutérogénation du cycle aromatique du furane, conduisant à la formation de THF-d_4. À l'inverse, le catalyseur TaIr/SiO_2 deutère rapidement les liaisons C–H aromatiques pour produire du furane-d_4 et, dans une moindre mesure, promeut également la deutérogénation, mais plus lentement. En tirant parti de ces propriétés, nous avons développé une approche tandem élégante et inédite permettant la production efficace de tétrahydrofurane perdeutéré à partir du furane (*figure 5b*), avec jusqu'à 97 % d'incorporation totale de deutérium dans des conditions très douces (25-70 °C, < 1 bar de D_2) [15].
Dans le cas du THF-d_8, travailler en l'absence de solvant présente un avantage particulier, le THF étant miscible avec la plupart des solvants organiques ainsi qu'avec l'eau. Les rares méthodes décrites pour la préparation de THF deutéré présentent non seulement des performances limitées, mais sont également conduites en conditions diluées, rendant la récupération du solvant deutéré pur extrêmement difficile. À l'inverse, ce procédé gaz–solide, sans solvant, permet de récupérer le solvant pur par simple condensation, et pourrait être appliqué dans des procédés à flux continu, des avantages décisifs en vue d'une mise en œuvre industrielle. Cette avancée représente donc une étape majeure pour la production de solvants perdeutérés de haute valeur ajoutée.

En résumé, les réactions d'échange hydrogène/deutérium ne constituent plus seulement une curiosité académique. Les progrès réalisés dans la compréhension des mécanismes d'activation des liaisons C–H, combinés à la conception rationnelle de catalyseurs hétérobimétalliques supportés, permettent aujourd'hui d'envisager ces transformations comme des procédés efficaces, hautement sélectifs et potentiellement transposables à l'échelle industrielle. Ces avancées illustrent ainsi comment la chimie de surface et la coopération métal–métal peuvent être exploitées comme des leviers puissants pour repenser et optimiser les réactions d'échange isotopique.

[1] J. Atzrodt, V. Derdau, T. Fey, J. Zimmermann, The renaissance of H/D exchange, *Angew. Chemie. Int. Ed.*, **2007**, *46*, p. 7744-65, https://doi.org/10.1002/anie.200700039
[2] M. Lepron *et al.*, Nanocatalyzed hydrogen isotope exchange, *Acc. Chem. Res.*, **2021**, *54*, p. 1465-80, https://doi.org/10.1021/acs.accounts.0c00721
[3] R. Pony Yu, D. Hesk, N. Rivera, I. Pelczer, P.J. Chirik, Iron-catalysed tritiation of pharmaceuticals, *Nature*, **2016**, *529*, p. 195-99, https://doi.org/10.1038/nature16464
[4] W.J. Kerr, G.J. Knox, L.C. Paterson, Recent advances in iridium(I) catalysis towards directed hydrogen isotope exchange, *J. Label. Compd. Radiopharm.*, **2020**, *63*, p. 281-95, https://doi.org/10.1002/jlcr.3812
[5] J.A. Brown *et al.*, Highly active iridium(I) complexes for catalytic hydrogen isotope exchange, *Chem. Commun.*, **2008**, p. 1115-17, https://doi.org/10.1039/B715938B
[6] L. Escomel *et al.*, Strongly polarized iridium$^{\delta-}$- aluminum$^{\delta+}$ pairs: unconventional reactivity patterns including CO_2 cooperative reductive cleavage, *J. Am. Chem. Soc.*, **2021**, *143*, p. 4844-56, https://doi.org/10.1021/jacs.1c01725
[7] Z. Dubrawski *et al.*, Synergistic C-H bond activation across molybdenum-iridium multiply bonded complexes: a cascade of transformations, *Chem. Sci.*, **2025**, *16*, p. 14564-77, https://doi.org/10.1039/D5SC03465E
[8] A. Lachguar *et al.*, π-bonding of group 11 metals to a tantalum alkylidyne alkyl complex promotes unusual tautomerism to bis-alkylidene and CO_2 to ketenyl transformation, *J. Am. Chem. Soc.*, **2024**, *146*, p. 18306-19, https://doi.org/10.1021/jacs.4c02172
[9] A. Lachguar, A.V. Pichugov, T. Neumann, Z. Dubrawski, C. Camp, Cooperative activation of carbon–hydrogen bonds by heterobimetallic systems, *Dalt. Trans.*, **2023**, *53*, p. 1393-409, https://doi.org/10.1039/D3DT03571A
[10] A. Lachguar *et al.*, Catalytic H/D exchange of (hetero)arenes with early–late polyhydride heterobimetallic complexes: impact of transition metal pairs, *Dalt. Trans.*, **2025**, *54*, p. 3804-11, https://doi.org/10.1039/D4DT03171G
[11] S. Lassalle *et al.*, Metal–metal synergy in well-defined surface tantalum–iridium heterobimetallic catalysts for H/D exchange reactions, *J. Am. Chem. Soc.*, **2019**, *141*, p. 19321-35, https://doi.org/10.1021/jacs.9b08311
[12] I.D. Rosal *et al.*, Mechanistic investigations *via* DFT support the cooperative heterobimetallic C–H and O–H bond activation across Ta=Ir multiple bonds, *Dalt. Trans.*, **2021**, *50*, p. 504-10, https://doi.org/10.1039/D0DT03818K
[13] L. Escomel *et al.*, Highly dispersed silica-supported iridium and iridium–aluminium catalysts for methane activation prepared via surface organometallic chemistry, *Chem. Commun.*, **2022**, *58*, p. 8214-17, https://doi.org/10.1039/D2CC02139K
[14] A.V. Pichugov *et al.*, Highly selective and efficient perdeuteration of n-pentane via H/D exchange catalyzed by a silica-supported hafnium-iridium bimetallic complex, *Angew. Chemie Int. Ed.*, **2024**, *63*, e202400992, https://doi.org/10.1002/anie.202400992
[15] A.V Pichugov *et al.*, Synthesis of perdeuterated pentane and THF under mild conditions by silica-supported Ta/M (M = Co, Ir) heterobimetallic catalysts, *Angew. Chemie Int. Ed.*, **2025**, *65*, e22721, DOI 10.1002/anie.202522721

Absorption UV par l'ADN

Des processus fondamentaux aux applications optoélectroniques

Dimitra MARKOVITSI

Université Paris-Saclay, CNRS, Institut de Chimie Physique, UMR8000, 91405 Orsay.
✉ dimitra.markovitsi@université-paris-saclay.fr

Résumé Depuis le début du XXIe siècle, des progrès majeurs ont été accomplis dans la compréhension des processus élémentaires déclenchés par l'absorption du rayonnement UV directement par l'ADN. Ces avancées ont été rendues possibles grâce à des techniques de spectroscopie résolues en temps (absorption, fluorescence) combinées à des méthodes de la chimie théorique. Ces travaux ont mis en évidence le rôle crucial des interactions entre bases nucléiques au sein de simples, doubles et quadruples brins, un phénomène déterminant à la fois pour les réactions photochimiques et les processus de photoionisation. Ils ont également apporté un éclairage nouveau sur la réactivité des radicaux cations. De telles connaissances sont essentielles pour mieux rationaliser les photodommages de l'ADN générés sans médiation des molécules environnantes. Elles offrent aussi un socle solide pour envisager la conception de dispositifs optoélectroniques utilisant les acides nucléiques comme matériaux actifs biosourcés, en tirant parti de leurs propriétés intrinsèques, fluorescence et photogénération des porteurs de charge.

Mots-clés **ADN, états électroniquement excités, spectroscopie résolue en temps, fluorescence, absorption transitoire, chimie quantique, photoionisation, radicaux, dommages oxydatifs, biocapteurs sans marquage, optoélectronique.**

Abstract **UV absorption by DNA: from fundamental processes to optoelectronic applications**
Since the beginning of the 21st century, major advances have been made in understanding the elementary processes triggered by the direct absorption of UV radiation by DNA. These advances have been enabled by time-resolved spectroscopies (absorption, fluorescence) combined with theoretical chemistry methods. Such studies have highlighted the crucial role of interactions between nucleobases within single, double, and quadruple strands–interactions that are decisive for both photochemical reactions and photoionization processes. Furthermore, they have provided new insights into the reactivity of radical cations. This knowledge is essential for a better rationalization of the DNA photodamage generated without mediation of any surrounding molecules. It also provides a solid foundation for the design of optoelectronic devices using nucleic acids as active bio-based materials by exploiting their intrinsic properties: fluorescence and the photogeneration of charge carriers.

Keywords **DNA, electronically excited states, time-resolved spectroscopy, fluorescence, transient absorption, quantum chemistry, photoionization, radicals, oxidative damage, label-free biosensors, optoelectronics.**

https://doi.org/10.63133/scf.act-chim.2026.519.05

Depuis la découverte de la structure en double hélice en 1953, associée à celle de l'inactivation des bactéries par le rayonnement ultraviolet (UV), la communauté scientifique s'est vivement intéressée à l'interaction entre le rayonnement UV et les acides nucléiques. La première étude consacrée aux propriétés optiques de l'ADN et de ses constituants a été publiée en 1955 [1]. Une dizaine d'années plus tard, Johns et ses collaborateurs mettaient en évidence la photodimérisation de la thymine [2], qui s'est révélée à l'origine de lésions cancérigènes. Dès ces travaux pionniers, les réactions de photodimérisation furent rationalisées à l'aide des concepts d'états électroniquement excités, de dynamique réactionnelle et de rendements quantiques.

Bien que les processus fondamentaux déclenchés par l'absorption UV par l'ADN aient commencé à être explorés dès les années 1980 grâce à la spectroscopie résolue en temps, la résolution temporelle limitée des équipements de l'époque constituait un obstacle de taille. Ce n'est qu'au XXIe siècle, à la faveur d'avancées technologiques décisives, que des expériences à l'échelle femtoseconde sous excitation UV ont pu être réalisées [3-6]. Parallèlement, l'amélioration des méthodes de chimie quantique a permis de modéliser des systèmes complexes, avec plusieurs bases nucléiques, mettant en lumière le rôle crucial de leur couplage électronique [7,8]. Cet élan a également suscité un regain d'intérêt pour les études spectroscopiques à des échelles de temps plus longues, bénéficiant de protocoles expérimentaux spécifiquement adaptés à l'étude de l'ADN par impulsions laser [9].

À ce jour, de nombreux travaux ont apporté des informations précieuses sur les états excités responsables de l'absorption et de l'émission de photons, sur diverses réactions photochimiques, sur la photoionisation, ainsi que sur certaines réactions chimiques « noires » consécutives aux processus photoinduits, qui se déroulent à l'état électronique fondamental. L'influence de la structure secondaire (*figure 1*), de la séquence des bases et de la polarité des brins sur ces phénomènes a été clairement établie. La compréhension des facteurs régissant ces processus fondamentaux permet en outre d'extrapoler

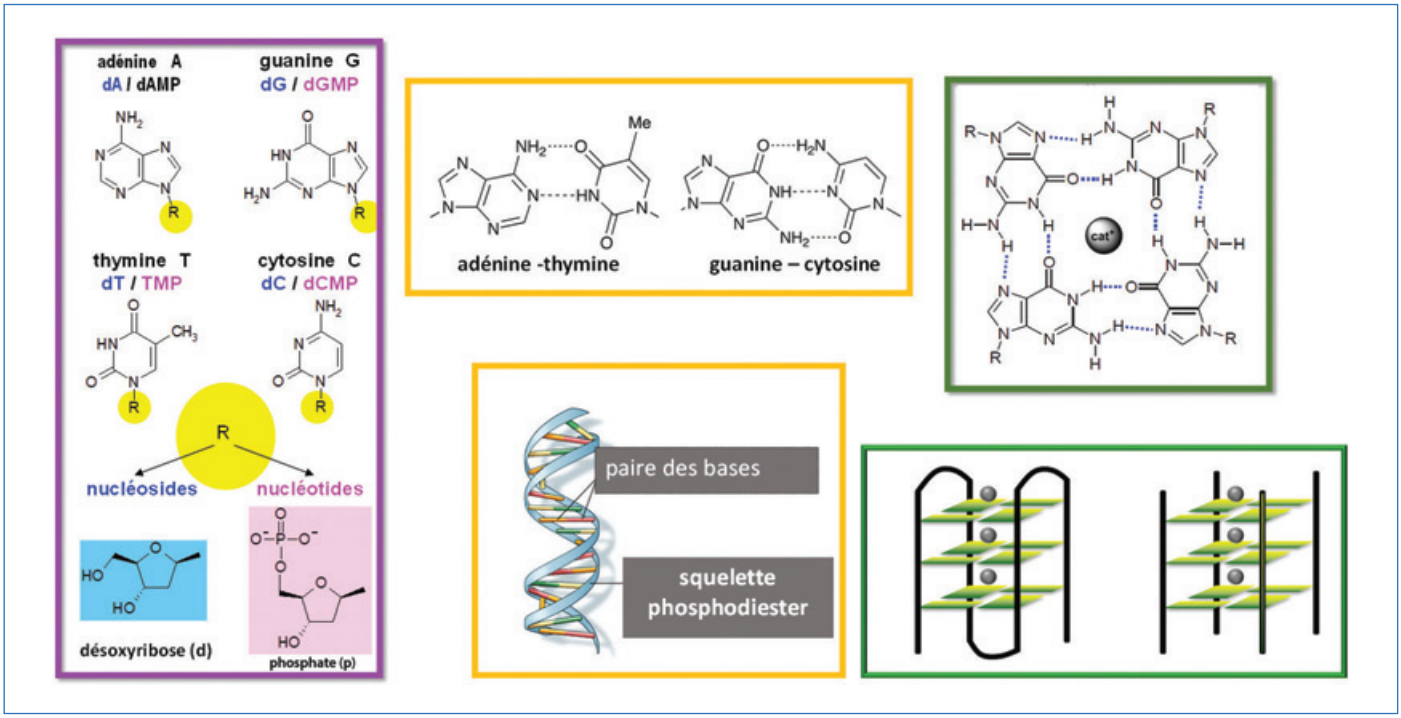


Figure 1 - Encadré violet : les briques élémentaires de l'ADN. Bases (X = A, G, T, C) ; désoxyribose (d) ; phosphate (p), nucléosides (dX), nucléotides (dXM). Encadrés jaunes : paires de bases, éléments structuraux des doubles hélices. Encadrés verts : tétrade de guanines associé à un ion métallique, brique élémentaire de quadruplexes ; représentation schématique des deux quadruplexes formés par repliement d'un brin (à gauche) ou par association de quatre brins d'ADN (à droite).

certaines conclusions, obtenues en solution aqueuse, vers des milieux biologiques plus complexes, non accessibles à ce type d'expériences.

Plusieurs de ces études ont été menées en France, avec des publications dans *L'Actualité Chimique* en 2007 [10] et 2015 [11]. Depuis, ce domaine s'est structuré à l'échelle européenne *via* le réseau « LightDyNAmics – DNA as a training platform for photodynamic processes in soft materials » (ITN - grant No. 765266).

La suite de cet article se concentre sur quelques résultats phares : l'interaction avec le rayonnement UVA ; la dynamique de formation des états à transfert de charge (états CT) ; les états excités de haute énergie et à longue durée de vie ; la photoionisation à basse énergie et la réactivité des radicaux cations. Enfin, il évoquera comment la compréhension de ces processus fondamentaux, déclenchés par l'absorption directe du rayonnement UV par l'ADN, pourrait être mise à profit pour le développement de biocapteurs à acides nucléiques sans marquage.

La synergie peut mener vers l'UVA

Longtemps considéré comme spectroscopiquement inerte vis-à-vis de l'ADN, le rayonnement UVA a été associé à des dommages générés par des mécanismes indirects, impliquant la médiation d'autres molécules (photosensibilisateurs). Pourtant, dès les années 1980, des mesures sur de l'ADN génomique révélaient l'existence d'une très faible absorption au-delà de 300 nm [12]. Cette absorption, absente chez les constituants monomères de l'ADN, avait été initialement corrélée à la présence des paires de bases guanine-cytosine.

Des expériences de spectroscopie d'absorption et de fluorescence, menées sur des simples brins constitués de vingt bases identiques – adénines (dA_{20}) ou thymines (dT_{20}) – ainsi que sur la double hélice formée par leur appariement (dA_{20}·dT_{20}), combinées à des calculs de chimie quantique sur des systèmes

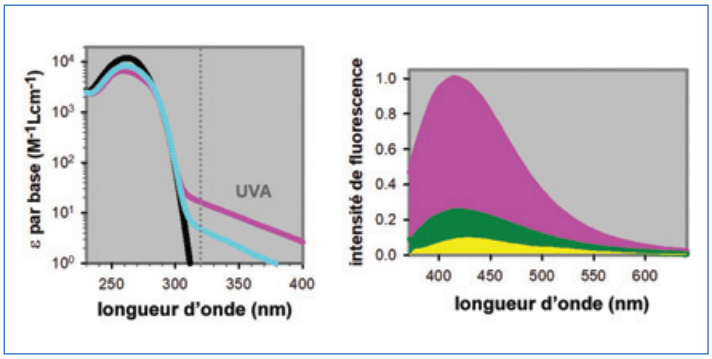


Figure 2 - Effet de l'organisation moléculaire sur les spectres d'absorption et de fluorescence (excitation à 330 nm) : double brin dA_{20}•dT_{20} (rose), mélange équimolaire des simples brins dA_{20} et dT_{20} (cyan), mélange équimolaire des mononucléosides dA et dT (noir), simple brin dA_{20} (vert) et simple brin dT_{20} (jaune). Schéma établi à partir des références [13] et [14].

modèles, ont permis de rationaliser cette absorption intrigante [13]. Il s'agit, en réalité, d'une synergie entre les bases : leur arrangement géométrique au sein de la double hélice favorise le couplage électronique, donnant naissance à des états excités collectifs de basse énergie dont le spectre s'étend jusque dans le domaine UVA (*figure 2*). Dans les simples brins, moins structurés, ce couplage est moins efficace et l'absorption y est, par conséquent, nettement moins intense.

Une autre conclusion importante de ces études fondamentales concerne la propension des états excités « UVA » à générer des lésions photoinduites. Ainsi, le rendement quantique de formation de dimères de cyclobutane de thymine sous irradiation UVA s'est révélé sept fois plus élevé pour le double brin dA_{20}·dT_{20} que pour le simple brin dT_{20}, alors que l'inverse est observé sous irradiation UVC [13]. Par ailleurs, la formation de ces lésions cancérigènes a également été observée sur de l'ADN génomique purifié, prouvant l'existence d'une photoréactivité « UVA » intrinsèque de cette biomolécule, indépendante de tout agent extérieur [14].

Formation des états à transfert de charge : une nouvelle approche de la dynamique aux temps très courts

Dès la fin du siècle dernier, il est apparu que les déclins de fluorescence des simples et doubles brins d'ADN présentaient des composantes bien plus longues que ceux de leurs briques élémentaires. Il est désormais établi que ces composantes correspondent à des états CT, au sein desquels une fraction plus ou moins importante de la charge atomique a été transférée entre deux bases [7,8].

Au fil des années, la durée de vie de tels états CT – souvent qualifiés d'excimères ou d'exciplexes – a été caractérisée pour de nombreuses structures d'ADN, les constantes de temps rapportées variant de 5 à 600 ps. En revanche, la détermination du temps nécessaire à leur formation restait un défi de taille. Ce verrou a été levé dans le cadre d'une collaboration européenne : des expériences d'absorption transitoire, effectuées sur une série de dinucléotides constitués de deux bases différentes X et Y (dXpdY, *figure 1*) au Politecnico di Milano (projet Lasers4EU N° 36455), ont démontré que ce temps de formation se situe entre 90 et 130 fs (*figure 3*) et dépend étroitement de l'agencement des bases (dXpdY ≠ dYpdY) [15,16].

Outre une résolution temporelle exceptionnelle (30 fs), ce travail repose sur une innovation méthodologique majeure. Jusqu'alors, la plupart des études analysaient les données de spectroscopie résolue en temps au moyen des ajustements par fonctions multi-exponentielles, attribuant chaque constante de temps à un état excité spécifique. Or, la notion même de « constante de temps » devient inappropriée à des échelles de temps aussi brèves lorsque le système moléculaire évolue sur des surfaces d'énergie potentielle. Pendant ce temps, son énergie diminue et la structure électronique se transforme en permanence (modification de longueurs et angles des liaisons chimiques, redistribution de la charge atomique).

Pour pallier cette difficulté, les spectres d'absorption de chacun des états excités impliqués dans la relaxation ont été calculés à l'aide des méthodes de chimie quantique. Les signatures de ces spectres théoriques ont ensuite été identifiées dans des spectres d'absorption transitoire expérimentaux, permettant ainsi de suivre directement l'évolution des populations. Par exemple, les spectres calculés pour l'état CT du dinucléotide dGpdT présentent une bande d'absorption comprise entre 500 et 600 nm. Et dans les spectres expérimentaux, on observe l'apparition d'une telle bande (*figure 3*).

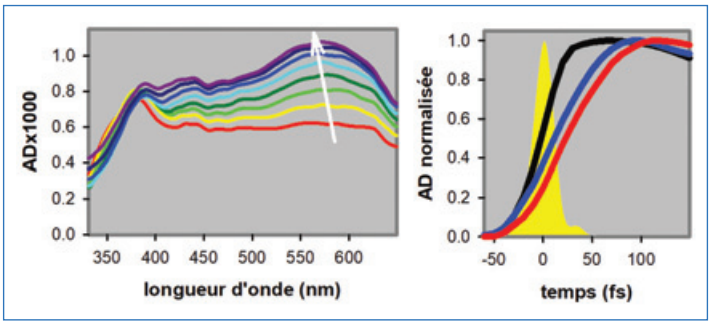


Figure 3 - Expériences d'absorption transitoire sur des dinucléotides associant guanine et thymine ; excitation à 266 nm. (Gauche) Spectres enregistrés pour dGpdT entre 30 fs (rouge) et 100 fs (violet), avec un pas de 10 fs. (Droite) Cinétiques à 570 nm pour dGpdT (rouge), dTpdG (bleu) et un mélange équimolaire des mononucléosides dG et dT (noir). La fonction de réponse instrumentale est représentée en jaune. AD : absorption différentielle. La flèche blanche indique l'apparition de l'absorption de l'état à transfert de charge. Schéma établi à partir de la référence [16].

Au-delà de l'ADN, cette approche hybride (combinant étroitement expérience et théorie) peut être appliquée à de nombreux autres systèmes moléculaires afin de caractériser leur comportement durant les tout premiers instants suivant l'excitation lumineuse.

Des états excités aux propriétés inattendues : haute énergie et longue durée de vie

Pendant longtemps, les composantes de fluorescence de plus longue durée de vie observées pour des structures d'ADN ont été attribuées à des états CT, dont l'énergie est plus basse que celle de leurs constituants monomères. Ce paradigme a toutefois été battu en brèche avec la découverte d'une nouvelle émission à courtes longueurs d'onde, baptisée HENE (« *High-Energy Nanosecond Emission* ») [17].

La HENE est omniprésente dans la fluorescence des doubles brins, y compris dans celle de l'ADN génomique, alors qu'elle est totalement absente dans le cas des simples brins. Elle apparaît autour de 305 nm et persiste sur plusieurs nanosecondes (*figure 4*). Les doubles hélices polymères formées de séquences alternées guanine-cytosine en offrent l'exemple le plus frappant, leur spectre de fluorescence étant entièrement dominé par ce type d'émission.

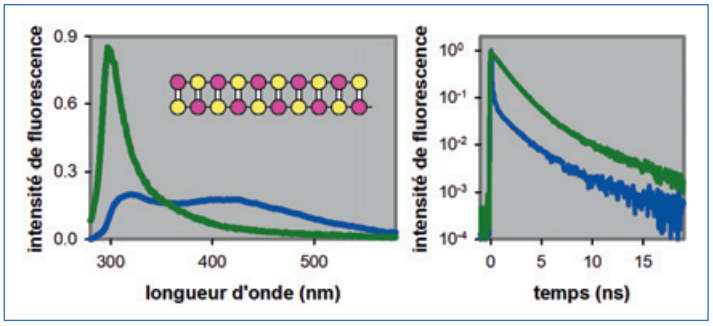


Figure 4 - Effet de la rigidité de la double hélice, formée par des séquences alternées guanine-cytosine (cercles roses et jaunes) sur sa fluorescence à haute énergie et de longue durée de vie (HENE). (Gauche) Spectres de fluorescence ; excitation à 255 nm. (Droite) Déclins de fluorescence à 305 nm ; excitation à 267 nm. Les séquences alternées guanine-cytosine (vert) et adénine-thymine (bleu) comportent, respectivement, trois et deux liaisons hydrogène par paire de bases. Schéma établi à partir de la référence [17].

Selon des études de chimie quantique, la HENE provient d'états excités délocalisés sur au moins deux paires de bases, issus par un couplage excitonique associé à un faible transfert de charge. Cette interprétation est confortée par plusieurs observations expérimentales, notamment la polarisation de fluorescence, la dépendance à la longueur de la double hélice ou à la force ionique de la solution aqueuse. Par son caractère collectif, la HENE se révèle extrêmement sensible aux perturbations de l'architecture de l'ADN. Et de ce fait, elle constitue une sonde prometteuse pour des applications, point qui sera discuté plus loin.

Photoionisation à basse énergie : un risque pour le vivant, une promesse pour les applications

Il est bien établi que l'ADN subit une photoionisation lorsqu'il absorbe un rayonnement UV à des longueurs d'onde inférieures à 200 nm. Cependant, au cours de la dernière décennie, il est apparu clairement que ce phénomène peut également se produire par absorption d'un seul photon

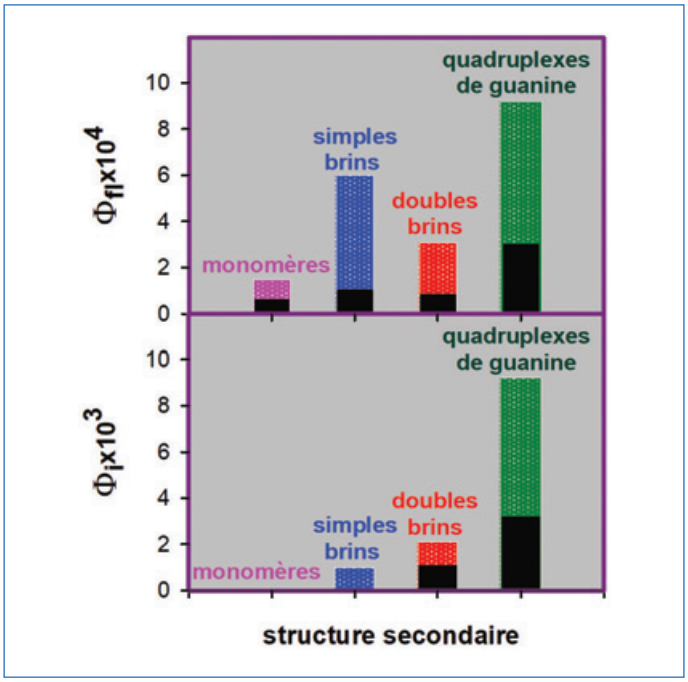


Figure 5 - Gammes de rendements quantiques (zones colorées) de fluorescence (Φ_{fl}, en haut) et de photoionisation (Φ_i, en bas) déterminées pour différentes structures ADN sous excitation à 266 nm. Schéma établi à partir des références [6], [21] et [25].

à des longueurs d'onde bien plus longues (énergies plus faibles), s'étendant jusqu'aux UVB [18] et UVA [19], bien qu'avec un rendement quantique Φ_i plus faible [20].

Des études menées sur diverses structures d'ADN en solution aqueuse par spectroscopie d'absorption transitoire nanoseconde avec excitation à 266 nm ont permis de caractériser, à partir de leurs spectres d'absorption, et de quantifier à la fois les électrons éjectés et les radicaux de guanine formés. Contrairement à la photoionisation à haute énergie, le Φ_i du processus à basse énergie dépend fortement de la structure secondaire de l'ADN. Aucune photoionisation n'a pu être détectée pour les constituants monomères ($\Phi_i < 3 \times 10^{-4}$). En revanche, la valeur déterminée pour l'ADN génomique (2×10^{-3}) [21] est comparable à celle de la formation des dimères de pyrimidines, considérés comme les principales lésions induites par l'absorption directe du rayonnement UV par l'ADN. Des valeurs nettement plus élevées ont été observées pour des quadruplexes de guanine (*figure 5*), atteignant $1{,}5 \times 10^{-2}$ dans le cas de certains systèmes modèles.

Le mécanisme susceptible de rendre compte de ce phénomène inattendu est bien complexe. Il impliquerait la formation d'états CT au cours de la relaxation électronique, suivie d'une séparation des charges et de l'éjection d'un électron à partir de la base portant la charge négative. La charge positive se localise alors sur un site guanine (radical cation, $G^{\bullet+}$), car le potentiel d'oxydation de guanine est plus faible que celui des autres bases.

Ce processus revêt une importance majeure, tant pour la compréhension des dommages oxydatifs que pour le développement des applications futures dans le domaine de l'optoélectronique, qui sera abordé plus loin.

Réactivité des radicaux cations de guanine : le plus rapide gagne

Au-delà de l'importance intrinsèque de la photoionisation à basse énergie, ce processus a offert la possibilité de suivre le devenir des radicaux $G^{\bullet+}$ sur une large gamme de temps, allant de la centaine de nanoseconde à la centaine de milliseconde [22]. Cette avancée est essentielle, car les expériences d'absorption transitoire utilisant une excitation UV de haute énergie ionisent également l'eau, donnant lieu à des réactions secondaires indésirables qui compliquent, voire faussent, l'interprétation des résultats.

À pH neutre, les radicaux $G^{\bullet+}$ ont tendance à perdre un proton, générant des radicaux neutres, $G^{\bullet}$. En présence d'oxygène, ils peuvent également évoluer vers des lésions oxydatives telles que la 8-oxo-7,8-dihydro-2'-désoxyguanosine (8-oxodG). Lorsqu'il existe une compétition entre plusieurs voies réactionnelles, la majeure partie de la population des espèces réactives évolue selon la voie la plus rapide. Dans le cas de l'ADN génomique, la déprotonation est achevée en moins de 2 µs [21] ; à ce stade, les spectres d'absorption transitoire montrent que la quasi-totalité (> 95 %) de la population de $G^{\bullet+}$ s'est transformée en $G^{\bullet}$. Il n'est donc pas surprenant que le rendement quantique déterminé pour la formation de 8-oxodG par des méthodes analytiques ne représente qu'environ 2 % de la population initiale de $G^{\bullet+}$ [18].

Notons que la 8-oxodG, qui peut être formée par d'autres voies réactionnelles impliquant des radicaux libres, est considérée comme marqueur des dommages oxydatifs de l'ADN. Les études des processus fondamentaux montrent clairement que, lorsque l'étape primaire implique la génération de radicaux $G^{\bullet+}$, la 8-oxodG ne reflète qu'une fraction très minoritaire des $G^{\bullet+}$ initialement formés. Cette observation invite à une certaine prudence dans l'interprétation des bilans de photodommages fondés uniquement sur ce marqueur.

Une fois le « gagnant » de cette compétition cinétique identifié, il reste à déterminer la nature des lésions finales issues des radicaux déprotonés et à les quantifier en termes de rendements quantiques. La balle se trouve désormais dans le camp de la chimie analytique.

Perspectives

Le développement de dispositifs optoélectroniques utilisant l'ADN sans marquage, actuellement en exploration, ouvre des perspectives prometteuses pour de nombreuses applications. Une telle approche permet de s'affranchir de l'étape de synthèse, souvent coûteuse et chronophage, nécessaire au greffage chimique de sondes sur les acides nucléiques. Elle évite également les incertitudes expérimentales liées aux associations non covalentes (intercalation ou interaction de sillon) entre un marqueur externe et l'ADN.

Dans ce contexte, l'utilisation de la fluorescence intrinsèque de l'ADN, dont l'intensité pourrait être exaltée par interaction avec une surface métallique (effet MEF, « *Metal-Enhanced Fluorescence* »), a été proposée dès 2016 [23]. Toutefois, cette étude exploratoire, menée sur des mononucléotides, ne prenait pas encore en compte la complexité des processus d'émission au sein des architectures structurées de l'ADN.

Ce n'est qu'à partir de 2019 que la fluorescence intrinsèque d'oligomères en solution a commencé à être examinée sous l'angle de leur architecture moléculaire. Comme souligné précédemment, l'organisation spatiale des bases détermine le couplage électronique, les voies de relaxation et, par conséquent, la nature des états émissifs. La maîtrise de ces paramètres fondamentaux constitue désormais un levier essentiel pour transformer une molécule biologique en un matériau actif pour la biodétection.

Plusieurs types d'applications, résumés dans les références [24] et [25], reposant principalement sur la variation du profil spectral et/ou de l'intensité de fluorescence des acides nucléiques lors de leur interaction avec diverses espèces moléculaires, ont été explorés. Ainsi, par exemple, la présence des ions métalliques Pb^{2+} dans l'eau, la fixation d'aptamères, ou encore l'interaction de l'ADN avec des colorants quinoléiniques (couramment utilisés dans les industries agroalimentaire et pharmaceutique) ont pu être détectées.

Parallèlement, le criblage à haut débit d'un grand nombre de séquences a été rendu possible grâce à la fluorescence [26], tandis que la technique de fluorescence synchrone a été employée pour l'authentification de vaccins contre la COVID-19. L'évaluation de la fluorescence intrinsèque a également été intégrée dans une analyse multi-attributs du virus adéno-associé (AAV). Dans le même esprit, un tel test optique a été mis au point afin d'évaluer la liaison de petites molécules à potentiel anticancéreux sur des quadruplexes de guanine.

Une autre perspective prometteuse consisterait à détecter les dommages au sein des doubles hélices en sondant leur fluorescence intrinsèque [24]. Cette approche pourrait tirer parti de l'émission à courte longueur d'onde et longue durée de vie (HENE) mentionnée précédemment. Issue d'états excités collectifs particulièrement sensibles à la configuration géométrique de la double hélice, cette émission voit son intensité diminuer en présence de lésions induisant des altérations électroniques de bases et des distorsions de leur arrangement géométrique, offrant ainsi un capteur direct de l'intégrité génétique.

Si l'exploration de la fluorescence de l'ADN est aujourd'hui bien engagée, il n'en va pas de même pour l'exploitation des porteurs de charge générés par photoionisation. Il est vrai que ce processus à haute énergie ($\lambda < 200$ nm), bien que documenté de longue date, reste inadapté aux applications biologiques ou technologiques courantes en raison de ses effets délétères. En revanche, la photoionisation de l'ADN à basse énergie, découverte récemment, apparaît, *a priori*, comme une voie attractive pour l'élaboration de dispositifs optoélectroniques.

En effet, les Φ_i déterminés à 266 nm sont supérieurs d'un ordre de grandeur aux rendements quantiques de fluorescence Φ_{fl} (*figure 5*). De plus, ce mécanisme permet une meilleure discrimination des structures secondaires de l'acide nucléique. Enfin, il offre la possibilité d'exploiter aussi bien les électrons éjectés que les « trous » (radicaux cations) générés au sein de la structure.

Dans cette perspective, les quadruplexes de guanine apparaissent comme les candidats particulièrement prometteurs [25]. Leurs Φ_i sont nettement supérieurs à ceux observés pour les autres structures secondaires. De surcroît, leur sensibilité aux différents éléments structuraux, alliée à leur grande modularité, constitue un atout majeur pour le développement de tels dispositifs.

Vers l'optoélectronique de demain

Le changement de paradigme opéré depuis vingt ans est majeur : l'ADN n'est plus seulement perçu comme une cible passive du rayonnement UV, mais comme un système « photophysicochimique » complexe et dynamique. La compréhension des processus fondamentaux – de la délocalisation des états électroniquement excités à la réactivité des radicaux cations – a montré que la réponse de l'ADN à la lumière est étroitement liée à son organisation spatiale. Plusieurs aspects discutés ici mériteraient d'être enrichis par des études de dichroïsme circulaire résolu en temps, actuellement davantage centrées sur la dynamique structurale des acides nucléiques. Ces avancées offrent aux chercheurs qui s'intéressent aux lésions finales de nouvelles pistes pour élucider l'origine des dommages provoqués par un mécanisme direct, sans médiation d'autres molécules. Par ailleurs, la combinaison de la chimie théorique avec des spectroscopies optiques résolues en temps de 30 fs à 300 ms, mise en œuvre pour l'ADN, a conduit au développement d'approches innovantes transposables à d'autres systèmes moléculaires.

Au-delà de l'enjeu de santé publique, ces découvertes ouvrent une voie féconde vers l'électronique moléculaire. La caractérisation des facteurs qui modulent, d'une part, la fluorescence intrinsèque des acides nucléiques et, d'autre part, leur capacité à photogénérer des porteurs de charge, place ces biomolécules au premier rang des matériaux biosourcés pour l'optoélectronique de demain.

La boucle est ainsi bouclée : les recherches initialement motivées au départ par la vulnérabilité de notre code génétique face au rayonnement UV constituent aujourd'hui le socle technologique prometteur d'applications radicalement nouvelles.

[1] G. H. Beaven, E. R. Holiday, E. A. Johnson, *Optical properties of nucleic acids and their components*, Academic Press, **1955**.
[2] G. J. Fisher, H. E. Johns, Ultraviolet photochemistry of thymine in aqueous solution, *Photochem. Photobiol.*, **1970**, *11*, p. 429-44.
[3] N. K. Schwalb, F. Temps, Base sequence and higher-order structure induce the complex excited-state dynamics in DNA, *Science*, **2008**, *322*, p. 243-45.
[4] W. J. Schreier, P. Gilch, W. Zinth, Early events of DNA photodamage, *Annu. Rev. Phys. Chem.*, **2015**, *66*, p. 497-519.
[5] A. Hanes, Y. Y. Zhang, B. Kohler, Tracking excited electronic states in DNA from formation to deactivation, In *DNA PHOTODAMAGE: From Light Absorption to Cellular Responses and Skin Cancer*, Vol. 21, R. Improta and T. Douki (eds), **2022**, pp. 77-104.
[6] T. Gustavsson, D. Markovitsi, Fundamentals of the intrinsic DNA fluorescence, *Acc. Chem. Res.*, **2021**, *54*, p. 1226-35.
[7] S. Matsika, A. H. Marcus, *Nucleic Acid Photophysics and Photochemistry*, Springer, **2024**.
[8] R. Improta, T. Douki, *DNA Photodamage: From Light Absorption to Cellular Responses and Skin Cancer*, RSC, Cambridge, **2021**.
[9] D. Markovitsi, D. Onidas, F. Talbot, S. Marguet, T. Gustavsson, E. Lazzarotto, UVB/UVC induced processes in model DNA helices studied by time-resolved spectroscopy: pitfalls and tricks, *J. Photochem. Photobiol. A-Chem.*, **2006**, *183*, p. 1-8.
[10] D. Markovitsi *et al.*, Les photodommages de l'ADN, *L'Act. Chim.*, **2007**, p. 8-14, https://new.societechimiquedefrance.fr/numero/les-photodommages-dadn-p8-n308-309
[11] D. Markovitsi, T. Gustavsson, A. Banyasz, La fluorescence intinsèque de l'ADN, *L'Act. Chim.*, **2015**, *397-398*, p. 29-34, https://new.societechimiquedefrance.fr/numero/les-photodommages-dadn-p8-n308-309
[12] J. C. Sutherland, K. P. Griffin, Absorption spectrum of DNA for wavelengths greater than 300 nm, *Radiat. Res.*, **1981**, *86*, p. 399-410.
[13] A. Banyasz *et al.*, Base-pairing enhances fluorescence and favors cyclobutane dimer formation induced upon absorption of UVA radiation by DNA, *J. Am. Chem. Soc.*, **2011**, *133*, p. 5163-65.
[14] S. Mouret *et al.*, UVA-induced cyclobutane pyrimidine dimers in DNA: a direct photochemical mechanism?, *Org. Biomol. Chem.*, **2010**, *8*, p. 1706-11.
[15] V. Petropoulos *et al.*, Real-time observation of sub-100-fs charge and energy transfer processes in DNA dinucleotides, *Chem. Sci.*, **2024**, *15*, p. 12098-107.
[16] V. Petropoulos *et al.*, Ultrafast dynamics of the UV-induced electronic relaxation in DNA guanine-thymine dinucleotides: from the Franck-Condon states to the minima of the potential energy surfaces, *Phys. Chem. Chem. Phys.*, **2025**, *27*, p. 14936-47.
[17] T. Gustavsson, D. Markovitsi, The ubiquity of high-energy nanosecond fluorescence in DNA duplexes, *J. Phys. Chem. Lett.*, **2023**, *14*, p. 2141-47.
[18] M. Gomez-Mendoza, A. Banyasz, T. Douki, D. Markovitsi, J. L. Ravanat, Direct oxidative damage of naked DNA generated upon absorption of UV radiation by nucleobases, *J. Phys. Chem. Lett.*, **2016**, *7*, p. 3945-48.
[19] J. Teychene, D. Didacus-Prins, N. Chouini-Lalanne, V. Sartor, C. Dejugnat, Formulation induces direct DNA UVA photooxidation. Part I. Role of the formulating cationic surfactant, *J. Mol. Liq.*, **2019**, *295*, 111712.
[20] E. Balanikas, D. Markovitsi, DNA photoionization: from high to low energies, In *DNA Photodamage: From Light Absorption to Cellular Responses and Skin Cancer*, R. Improta and T. Douki (eds), RSC, Cambridge, **2021**, pp. 37-54.
[21] E. Balanikas, A. Banyasz, T. Douki, G. Baldacchino, D. Markovitsi, Guanine radicals induced in DNA by low-energy photoionization, *Acc. Chem. Res.*, **2020**, *53*, p. 1511-19.
[22] E. Balanikas, A. Banyasz, G. Baldacchino, D. Markovitsi, Deprotonation dynamics of guanine radical cations, *Photochem. Photobiol.*, **2022**, *98*, p. 523-31.
[23] M. H. Chowdhury *et al.*, On the feasibility of using the intrinsic fluorescence of nucleotides for DNA sequencing, *J. Phys. Chem. C*, **2010**, *114*, p. 7448-61.
[24] D. Markovitsi, On the use of the intrinsic DNA fluorescence for monitoring its damage - A contribution from fundamental studies, *ACS Omega*, **2024**, *9*, p. 26826-37.
[25] D. Markovitsi, Processes triggered in guanine quadruplexes by direct absorption of UV radiation: From fundamental studies toward optoelectronic biosensors, *Photochem. Photobiol.*, **2024**, *100*, p. 262-74.
[26] M. Zuffo, A. Gandolfini, B. Heddi, A. Granzhan, Harnessing intrinsic fluorescence for typing of secondary structures of DNA, *Nucl. Ac. Res.*, **2020**, *48*, e61.

Nouveaux principes actifs pharmaceutiques

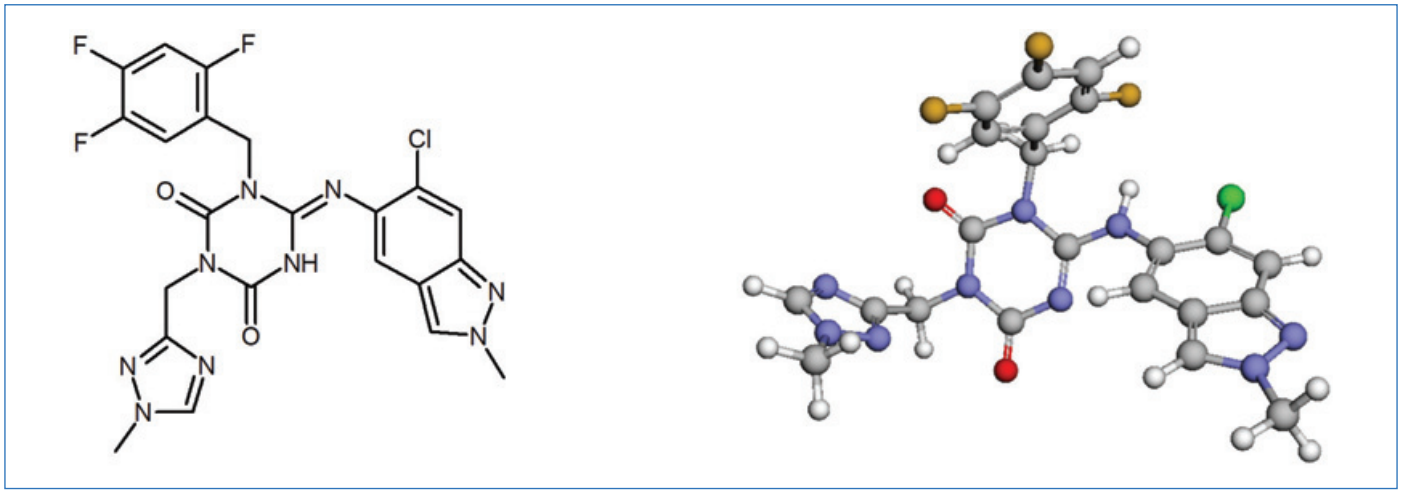
Bilan des approbations FDA en mai-juin 2026

Au cours de cette période huit molécules de synthèse et trois molécules d'origine biologique ont été approuvées.

Molécules de synthèse

Principe actif	Compagnie	Indication
Vepdegestrant	Rigel Pharms	Cancer du sein en récidive
Sonrotoclax	Beone Medicines Usa	Lymphome à cellules du manteau
Baxdrostat	Astrazeneca Ab	Hypertension résistante
Ensitrelvir	Shionogi	COVID 19
Cipepofol	Haisco Pharmaceutical Group Co Ltd	Anesthésie
Cefepime hydrochloride ; zidebactam	Wockhardt Bio Ag	Antibactérien actif sur souches résistantes
Gadoquatrane	Bayer Healthcare	Agent de contraste pour IRM
Tebipenem pivoxil hydrobromide	Glaxosmithkline	Antibactérien actif sur souches résistantes par voie orale

Le ***vepdegestrant*** recrute le système ubiquitine-protéasome pour cibler le récepteur des œstrogènes en vue de sa dégradation. Il est utilisé dans le traitement des cancers du sein en récidive ; en diminuant le nombre de récepteurs des œstrogènes, il diminue la multiplication des cellules.
Le ***sonrotoclax*** est un médicament anticancéreux utilisé pour traiter le lymphome à cellules du manteau. Il s'agit d'un inhibiteur de BCL-2 capable de surmonter la résistance associée aux mutations de BCL2, telle que le variant G101V, qui limite l'efficacité des inhibiteurs de première génération comme le vénétoclax. Il a reçu la désignation « *fast track* » de la FDA pour le traitement de la maladie de Waldenström, un lymphome voisin du lymphome à cellules du manteau.
Le ***baxdrostat*** est utilisé pour traiter l'hypertension. Il inhibe l'aldostérone synthase, un mécanisme différent de ceux des médicaments couramment utilisés.
L'***ensitrelvir*** est un antiviral utilisé pour traiter la COVID-19 ou pour prévenir l'infection par la COVID-19 après une exposition. Il agit en inhibant la protéase de type 3C (3CLpro) nécessaire au virus pour produire ses protéines actives. Il est réservé aux personnes à risque et est actif par voie orale.



Structure de l'ensitrelvir. Nomenclature : 6-[(6-chloro-2-methyl-2H-indazol-5-yl)imino]-3-[(1-methyl-1H-1,2,4-triazol-3-yl)methyl]-1-[(2,4,5-trifluorophenyl)methyl]-1,3,5-triazinane-2,4-dione ; n° CAS : 2647530-73-0. La représentation 3D provient du site Drugbank[1] : https://go.drugbank.com/structures/small_molecule_drugs/DB18834

Le ***cipepofol*** ou ***ciprofol*** est un anesthésique général apparenté au propofol, utilisé pour l'anesthésie et la sédation. Ce médicament est administré par perfusion intraveineuse et agit par modulation allostérique positive des récepteurs GABA-A hautement sélective et à action rapide. Le ciprofol est quatre à six fois plus puissant que d'autres dérivés phénoliques tels que le propofol ou le fospropofol.

Le ***céfépime/zidebactam*** est une association à dose fixe utilisée pour le traitement des infections urinaires compliquées. Il contient du céfépime, un antibiotique de la famille des céphalosporines, et du zidebactam, un inhibiteur de β-lactamase. La molécule de zidebactam possède une urée sous contrainte qui est capable de réagir avec le résidu sérine du site actif des β-lactamases. L'utilisation principale de cette classe d'inhibiteurs de β-lactamases (BLI) consiste à restaurer l'activité des antibiotiques β-lactamines contre les bactéries à Gram négatif résistantes lorsqu'ils sont administrés conjointement.
Le ***gadoquatrane*** est un agent de contraste macrocyclique à base de gadolinium utilisé dans le cadre de l'imagerie par résonance magnétique avec injection de produit de contraste pour détecter et visualiser des lésions présentant une vascularisation anormale dans certaines parties du corps.
Le ***tébipénem pivoxil*** est un antibiotique à large spectre de la famille des β-lactamines utilisé pour traiter les infections urinaires compliquées, y compris la pyélonéphrite. Cet antibiotique appartient au sous-groupe des carbapénèmes et permet de lutter contre des bactéries ayant acquis une résistance aux antibiotiques couramment utilisés. Le tébipénem est le premier carbapénème dont la forme promédicament (*prodrug*) est biodisponible par voie orale.

Molécule d'origine biologique

Principe actif	Type de molécule	Compagnie	Indication
Bulevirtide-gmod	Lipoprotéine	Gilead Sciences Inc	Hépatite D (HDV)
Pivekimab sunirine-pvzy	Anticorps-conjugué (ADC)	Abbvie Inc	Leucémie dérivée des cellules dendritiques plasmocytoïdes
Veligrotug-vvze	Anticorps monoclonal	Viridian Therapeutics Inc	Ophtalmopathie de Graves

Le ***bulévirtide*** est le premier et seul traitement approuvé par la FDA pour l'infection chronique par le VHD, une maladie grave et potentiellement mortelle pouvant entraîner une progression rapide de la fibrose hépatique, un cancer du foie, une insuffisance hépatique, voire le décès. L'infection par le VHD ne survient que chez les personnes déjà infectées par le virus de l'hépatite B (VHB). La vaccination contre le VHB protège également contre le VHD. Il agit en bloquant l'entrée du VHD et du VHB dans les cellules hépatiques, ciblant ainsi une étape clé du cycle de vie viral. Le bulévirtide est un lipopeptide de 47 acides aminés ayant la séquence suivante :
$CH_3(CH_2)_{12}$CO-Gly-Thr-Asn-Leu-Ser-Val-Pro-Asn-Pro-Leu-Gly-Phe-Phe-Pro-Asp-His-Gln-Leu-Asp-Pro-Ala-Phe-Gly-Ala-Asn-Ser-Asn-Asn-Pro-Asp-Trp-Asp-Phe-Asn-Pro-Asn-Lys-Asp-His-Trp-Pro-Glu-Ala-Asn-Lys-Val-Gly-NH_2.
Le ***pivekimab sunirine*** est un anticorps-conjugué (ADC) ciblant le CD123. Il est constitué d'un anticorps anti-CD123 à haute affinité, d'un lien clivable et d'une charge cytotoxique de type indolinobenzodiazépines (IGN). Il est principalement destiné au traitement des malignités hématologiques positives pour le CD123. La FDA lui a accordé la désignation de « *breakthrough therapy* » pour le traitement du BPDCN (« *blastic plasmacytoid dendritic cell neoplasm* »), une leucémie rare et agressive issue des cellules dendritiques plasmocytoïdes.
Le ***veligrotug*** est un anticorps monoclonal utilisé pour traiter l'ophtalmopathie de Graves ou maladie oculaire thyroïdienne (TED), affection auto-immune où le système immunitaire attaque les tissus et les muscles autour des yeux. Cette maladie survient le plus souvent chez des personnes atteintes de la maladie de Basedow et plus rarement de thyroïdite de Hashimoto. Le veligrotug agit par inhibition du récepteur du facteur de croissance analogue à l'insuline de type 1 (IGF-1R).

(1) Drugbank est une banque de données sur les principes actifs accessible sur Internet : D.S. Wishart *et al.*, DrugBank 5.0: a major update to the DrugBank database for 2018, *Nucleic Acids Res.*, **2018**, *46*, p. D1074-D1082.

Actualités phytopharmaceutiques

Août et septembre 2026

Retraits d'autorisations de mise sur le marché (AMM)

En août, un herbicide à base de metsulfuron-méthyle associé au tribénuron-méthyle a été retiré du marché, suivi, en septembre, d'un adjuvant à base d'huile de paraffine, d'un herbicide à base de diflufénican et d'un herbicide à base d'imazamox associé à l'aclonifène.

Nouvelles AMM

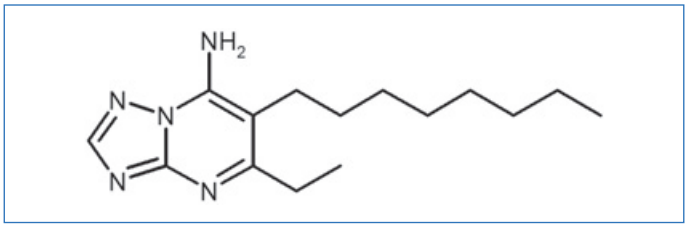
En août, de nouvelles autorisations de mise sur le marché ont été accordées à neuf fongicides, quatre herbicides, un insecticide et un attractif-phéromone. Les fongicides sont respectivement à base de lysat d'une amibe (Willaertia magna C2c Maky) en suspension concentrée pour cultures légumières, viticulture et cultures porte-graines et tropicales, plantes à parfum, aromatiques, médicinales et condimentaires ; à base de cymoxanil en granulé dispersable pour cultures légumières ; à base d'azoxystrobine associée au méfentrifluconazole en suspension concentrée pour grandes cultures ; à base de boscalide associé à la pyraclostrobine en granulé dispersable pour arboriculture ; à base de prothioconazole associé au bixafène sous forme de concentré émulsionnable pour grandes cultures ; à base d'une souche de *Bacillus subtilis* en suspension concentrée huileuse pour viticulture et cultures légumières ; à base d'hydrogénocarbonate de sodium en poudre hydrosoluble pour viticulture ; à base de boscalide en granulé dispersable pour grandes cultures, viticulture, cultures légumières, cultures porte-graines et tropicales, plantes à parfum, aromatiques, médicinales et condimentaires ; à base de méfentrifluconazole associé au prothioconazole en suspension concentrée pour grandes

cultures et cultures porte-graines et tropicales, plantes à parfum, aromatiques, médicinales et condimentaires.
Deux herbicides sont respectivement à base de mésotrione, l'un en suspension concentrée pour grandes cultures, cultures légumières, cultures porte-graines et tropicales, plantes à parfum, aromatiques, médicinales et condimentaires, l'autre en suspension concentrée pour grandes cultures. Les deux autres herbicides sont respectivement à base de diflufénican en suspension concentrée pour grandes cultures et à base d'aclonifène en suspension concentrée pour grandes cultures, cultures légumières, cultures porte-graines et tropicales, plantes à parfum, aromatiques, médicinales et condimentaires. Un attractif-phéromone à base d'acétate de (Z)-8-dodécen-1-yle, d'acétate de (E)-8-dodécen-1-yle et de (Z)-8-dodécen-1-ol, pour arboriculture, et un insecticide à base d'acétate de (E,Z,Z)-3,8,11-tétradécatrien-1-yle pour cultures légumières sont formulés en produit pour diffuseur de vapeur.
En septembre, de nouvelles autorisations de mise sur le marché concernent un répulsif et sept fongicides. Le répulsif est à base de carbonate de calcium et huile de poisson en gel prêt à l'emploi pour cultures porte-graines et tropicales, plantes à parfum, aromatiques, médicinales et condimentaires. Deux fongicides sont à base de fluxapyroxade en concentré émulsionnable pour grandes cultures. Les autres sont respectivement à base de prothioconazole en suspension concentrée pour traitement de semences en grandes cultures, cultures porte-graines et tropicales, plantes à parfum, aromatiques, médicinales et condimentaires ; à base de boscalide en granulé dispersable pour viticulture ; à base de chlorhydrate de propamocarbe associé à l'amétoctradine en suspension concentrée pour cultures légumières, à base de fosétyl d'aluminium associé au zoxamide sous forme de granulé dispersable pour viticulture, à base de dithianon sous forme de suspension concentrée pour viticulture, et à base de fluxapyroxade en concentré émulsionnable pour grandes cultures.

Modifications d'AMM (renouvellements, extensions d'usage, etc.)

En août, sont renouvelées les autorisations de six herbicides, respectivement à base de propaquizafop, mésotrione, metsulfuron-méthyle (2), pyraflufène-éthyle, florasulame associé à l'aminopyralide, au pyrosulame et au cloquintocet-mexyl. Sont aussi renouvelées les AMM d'un régulateur de croissance à base de 1,4-diméthylnaphtalène, de deux attractifs-phéromones à base d'acétates de (E,Z)-2,13-octadecadien-1-yle et (E,Z)-3,13-octadecadien-1-yle, d'un insecticide acaricide et fongicide et d'un adjuvant pour bouillie herbicide à base d'une huile de paraffine (CAS N° 64742- 46-7), enfin d'un fongicide à base de prothioconazole associé à la fenpicoxamide.
En septembre, l'ANSES publie l'AMM d'un herbicide à base de 2,4-D ainsi que celle d'un fongicide à base de phosphonates de potassium renouvelées fin juillet avec extension d'usage mineur.

L'***amétoctradine***[(2)] est un fongicide utilisé contre le mildiou.



Structure de l'*amétoctradine*. N° CAS : 865318-97-4 ; 5-Ethyl-6-octyl-[1,2,4]triazolo [1,5-a]pyrimidin-7-amine.

- Pour retrouver les informations sur les substances actives et la réglementation européenne associée, consulter https://food.ec.europa.eu/plants/pesticides/eu-pesticides-database_en
(2) https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/15604010 ; https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/15604010

Cette rubrique est coordonnée et alimentée par **Josette FOURNIER**, qui a présidé de 2007 à 2010 le comité d'orientation et de prospective scientifique de l'Observatoire des résidus de pesticides (ORP) (josette.fournier4@orange.fr), et **Jean-Marc PARIS**, ancien directeur de recherche pharmaceutique dans le groupe Rhône-Poulenc et ancien directeur scientifique de la chimie organique et biotechnologies de Rhodia (jeanmarc.paris@free.fr).

Plus d'énergies, moins d'émissions

Comprendre la stratégie multi-énergies de TotalEnergies

Sylvain PANAS

Directeur régional senior Occitanie, TotalEnergies.
✉ sylvain.panas@totalenergies.com

Résumé La transition énergétique confronte les acteurs industriels de l'énergie à une double exigence : satisfaire une demande mondiale d'énergie encore croissante et réduire rapidement les émissions de gaz à effet de serre. La stratégie « Plus d'énergies, moins d'émissions » de TotalEnergies répond à cette tension par la transformation progressive d'une compagnie historiquement pétrolière et gazière en entreprise multi-énergies. Deux piliers structurent cette trajectoire : un portefeuille pétrolier et gazier recherchant des coûts et des émissions faibles, et le développement d'*Integrated Power*, modèle intégré associant renouvelables, capacités flexibles, stockage, marchés et vente clients. En 2025, la production nette d'électricité atteint 48 TWh ; les émissions opérées de méthane ont diminué de 65 % par rapport à 2020, tandis que les émissions opérées de scopes 1 et 2 s'établissent à 33,1 Mt CO_2e contre 46 Mt en 2015. Cet article présente la logique industrielle et les leviers techniques de cette stratégie. Il distingue les résultats observés des objectifs prospectifs et souligne que la décarbonation combine efficacité énergétique, électrification, réduction du méthane, évolution du mix vendu et développement ciblé de molécules bas carbone.

Mots-clés **Transition énergétique, gaz à effet de serre, méthane, électricité bas carbone, efficacité énergétique, multi-énergies.**

Abstract **More energy, less emissions: understanding TotalEnergies' multi-energy strategy**
The energy transition confronts energy industrial players with a dual requirement: meeting a still-growing global demand for energy while rapidly reducing greenhouse-gas emissions. TotalEnergies' "More energy, less emissions" strategy addresses this tension through the gradual transformation of a historically oil and gas company into a multi-energy company. Two pillars structure this pathway: an oil and gas portfolio targeting low costs and low emissions, and the development of *Integrated Power*, an integrated model combining renewables, flexible generation, storage, markets and customers. In 2025, net electricity production reached 48 TWh; operated methane emissions were 65% lower than in 2020, while operated Scope 1 and 2 emissions stood at 33.1 Mt CO_2e, compared with 46 Mt in 2015. This article explains the industrial rationale and technical levers of the strategy. It distinguishes observed results from forward-looking targets and shows how decarbonization combines energy efficiency, electrification, methane abatement, evolution of the sales mix and targeted development of low-carbon molecules.

Keywords **Energy transition, greenhouse gases, methane, low-carbon electricity, energy efficiency, multi-energy.**

Le défi n'est pas de choisir entre énergie et climat

La demande d'énergie reste étroitement liée à la démographie, à l'urbanisation et au développement économique (*figure 1*). Dans les économies où l'accès à l'énergie demeure insuffisant, les premiers gains de consommation accompagnent fortement l'amélioration des conditions de vie. À l'inverse, dans les économies matures, les consommations supplémentaires procurent des bénéfices sociaux décroissants. Cette asymétrie conduit à un défi à deux faces : élargir l'accès à une énergie disponible et abordable là où elle manque, tout en maîtrisant les consommations et les émissions là où les usages sont déjà développés.
Le changement climatique impose simultanément une réduction profonde des émissions mondiales. Le système énergétique concentre une part majeure des émissions anthropiques, réparties entre production d'électricité, transport, industrie et bâtiments. Il n'existe donc pas de technologie unique permettant de traiter l'ensemble du problème. La décarbonation mobilise plusieurs familles de solutions : efficacité énergétique, électrification des usages, développement

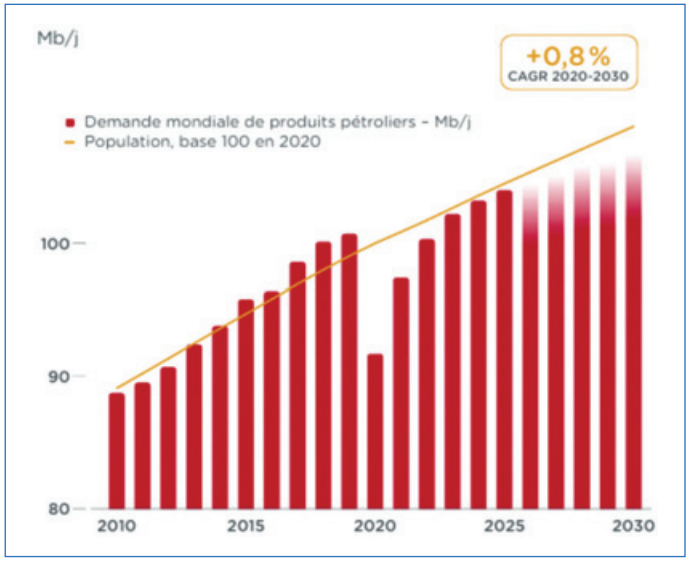


Figure 1 - Demande mondiale de produits pétroliers (Mb/j) et évolution de la population. La stratégie part d'une tension structurante : une demande énergétique durablement élevée et la nécessité de réduire les émissions associées.

des renouvelables et des moyens flexibles, substitutions de combustibles, réduction du méthane et, pour certaines émissions difficiles à éviter, captage et stockage du dioxyde de carbone (CO_2).
La formule « Plus d'énergies, moins d'émissions » condense cette lecture. « Plus d'énergies » ne signifie pas augmenter toutes les productions au même rythme. Il s'agit d'accroître l'offre totale en faisant évoluer sa composition. « Moins d'émissions » désigne à la fois la baisse des émissions propres aux opérations et la diminution progressive de l'intensité carbone du portefeuille de produits énergétiques vendus. Ces deux dimensions doivent être distinguées car elles relèvent de périmètres, d'indicateurs et de leviers différents.

Deux piliers pour transformer le portefeuille

La stratégie repose sur deux piliers de croissance complémentaires (*figure 2*). Le premier concerne le pétrole et le gaz. La compagnie privilégie des projets à bas point mort et à faibles émissions opérationnelles, avec une place importante accordée au gaz naturel liquéfié (GNL), dont la chaîne intégrée apporte flexibilité et diversification géographique. La production pétrole et gaz devrait progresser d'environ 3 % par an entre 2024 et 2030 ; 95 % de la production visée pour 2030 est déjà en service ou en développement.

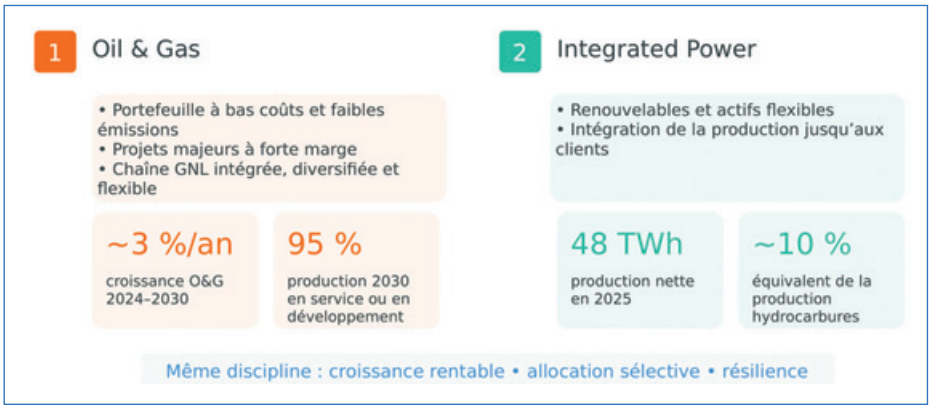


Figure 2 - Deux piliers complémentaires : *Oil & Gas* et *Integrated Power*, soumis à une même discipline d'investissement.

Le second pilier est *Integrated Power*. Il ne se réduit pas à la construction de capacités solaires ou éoliennes : le modèle associe la production renouvelable, les centrales flexibles nécessaires à l'équilibrage, le stockage, l'optimisation sur les marchés et la vente aux clients. En 2025, la production nette d'électricité a atteint 48 TWh, soit l'équivalent énergétique d'environ 10 % de la production d'hydrocarbures. Cette intégration cherche à réduire l'exposition à un seul maillon de la chaîne et à mieux gérer l'intermittence, les prix et l'adéquation entre production et demande.

Une trajectoire 2030 mesurée avec plusieurs indicateurs

La transformation du mix à l'horizon 2030 est attendue autour d'un équilibre indicatif : environ 40 % de pétrole, 40 % de gaz et 20 % d'électricité et de molécules bas carbone. La production totale d'énergie est annoncée en croissance d'environ 4 % par an entre 2024 et 2030. Cette évolution doit être lue conjointement avec trois familles d'indicateurs : les émissions directes des installations, les émissions de méthane et l'intensité carbone sur le cycle de vie des produits vendus.

Que désignent les scopes 1, 2 et 3 ?

Le *scope 1* couvre les émissions directes des installations exploitées. Le *scope 2* correspond aux émissions indirectes liées à l'énergie achetée et consommée. Le *scope 3* regroupe les autres émissions de la chaîne de valeur, notamment celles liées à l'usage des produits vendus.

Pour les installations opérées, les émissions de scopes* 1 et 2 se sont établies à 33,1 Mt CO_2e en 2025, contre 46 Mt en 2015. L'objectif affiché est une réduction nette de 40 % en 2030 par rapport à 2015. Plusieurs leviers cumulatifs entrent en jeu : évolution du portefeuille, efficacité énergétique, réduction du torchage et du méthane, recours à une électricité bas carbone, électrification de procédés et usage d'hydrogène bas carbone. Les puits de carbone fondés sur la nature sont présentés comme un complément à partir de 2030, et non comme le premier levier d'action.
L'intensité carbone du cycle de vie des produits énergétiques vendus a diminué de 18,6 % en 2025 par rapport à 2015, au-delà de l'objectif annuel de 17 %. La cible 2030 est une baisse de 25 % (*figure 3*). Un indicateur d'intensité rapporte les émissions à une quantité d'énergie vendue. Il renseigne sur l'évolution du mix, mais ne se confond pas avec une réduction absolue de toutes les émissions de la chaîne de valeur. Cette distinction est essentielle pour interpréter correctement les progrès annoncés.

Réduire le méthane : un levier rapide et mesurable

Le méthane (CH_4) constitue un levier prioritaire parce que ses émissions peuvent souvent être évitées par des actions opérationnelles ciblées. Sur les sites opérés, elles sont passées de 64 kt en 2020 à 22,5 kt en 2025, soit une baisse de 65 % (*figure 4*). L'intensité méthane est passée de 0,15 % à 0,07 % sur la même période. L'objectif annoncé est une réduction de 80 % en 2030 par rapport à 2020.
Les moyens mobilisés combinent mesure et intervention : campagnes de détection et réparation des fuites, surveillance permanente, réduction du torchage, récupération des gaz, remplacement de certains instruments fonctionnant au gaz et prévention de la récurrence des événements. La logique est celle d'une boucle industrielle courte : mesurer précisément, agir rapidement puis vérifier que la source ne réapparaît pas. Elle illustre le lien entre performance climatique et maîtrise opérationnelle, car une fuite évitée représente aussi une énergie non perdue.

Integrated Power : faire de l'électricité un métier intégré

L'électricité est appelée à prendre une place croissante dans la consommation finale mondiale, portée par l'électrification des transports, de la chaleur et de certains procédés industriels. TotalEnergies vise entre 100 et 120 TWh de production électrique en 2030. La capacité renouvelable brute installée est passée de 10 GW en 2021 à 26 GW en 2024 puis 34 GW en 2025.

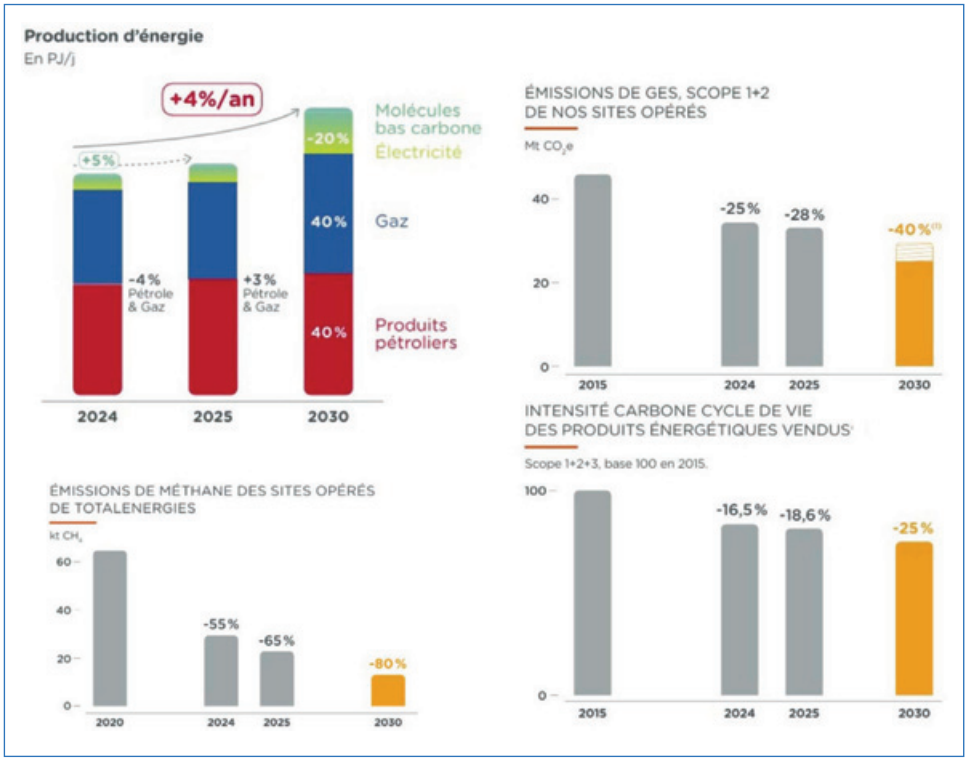


Figure 3 - L'objectif 2030 associe croissance de la production, transformation du mix et diminution de plusieurs indicateurs d'émissions (GES : gaz à effet de serre).

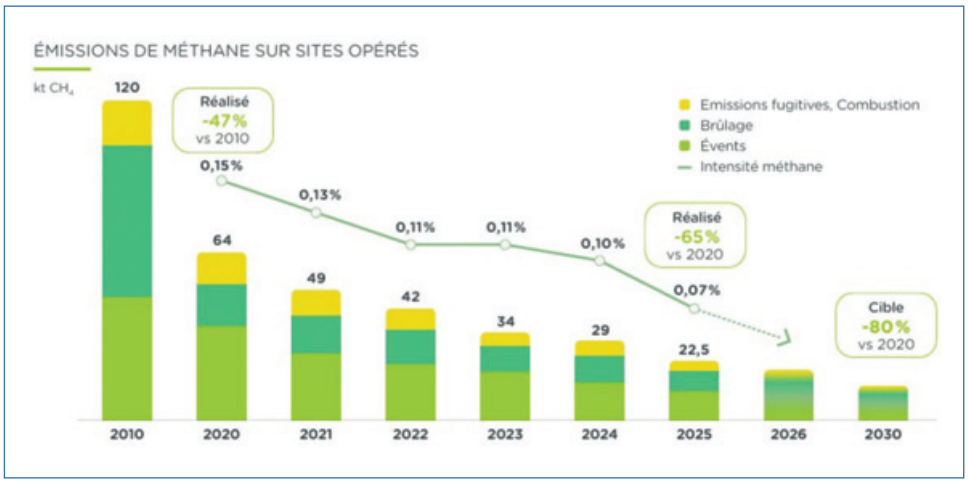


Figure 4 - Évolution des émissions et de l'intensité méthane sur les actifs opérés entre 2020 et 2025.

La seule addition de capacités renouvelables ne suffit cependant pas à garantir la fourniture à chaque instant. Solaire et éolien sont variables ; le système doit disposer de stockage, de flexibilité, d'interconnexions et d'outils d'optimisation. Le modèle *Integrated Power* associe donc quatre fonctions : produire, équilibrer, optimiser et vendre (*figure 5*). Les actifs flexibles, dont certaines centrales à gaz, sont présentés comme un moyen d'assurer l'équilibrage lorsque la production renouvelable varie. Leur contribution climatique dépend néanmoins de leur rendement, de leur taux d'utilisation, des émissions de méthane en amont et de la vitesse de développement des alternatives bas carbone.

Des molécules bas carbone pour les usages difficiles à électrifier

Tous les usages ne peuvent pas être électrifiés au même rythme. L'aviation, certains transports lourds et plusieurs procédés industriels nécessitent des molécules à forte densité énergétique ou des réactifs spécifiques. La stratégie retient donc une approche ciblée des carburants aériens durables, du biogaz, des biocarburants, de l'hydrogène bas carbone et du captage-stockage du CO_2. En France, cette orientation se traduit notamment par les bioraffineries de La Mède (Bouches-du-Rhône) et de Grandpuits (Seine-et-Marne), des capacités de production de biogaz, des projets d'hydrogène destinés à décarboner les raffineries européennes. Le choix affiché est celui de la sélectivité : privilégier les filières techniquement éprouvées, les ressources disponibles et les projets dont l'économie permet un déploiement industriel. Pour les carburants aériens durables, TotalEnergies disposent de capacités de production à La Mède, en Normandie et à Grandpuits, ainsi que des accords de fourniture avec des acteurs de l'aéronautique.

Cette stratégie ne supprime pas les arbitrages. La disponibilité des ressources biomasse, la traçabilité des matières premières, la consommation d'électricité nécessaire à l'hydrogène et les infrastructures de transport et de stockage du CO_2 conditionnent la pertinence environnementale des projets. L'analyse doit donc porter sur le cycle de vie complet, le coût d'abattement et la possibilité de déployer les solutions à l'échelle requise.

L'efficacité énergétique, premier gisement industriel

Avant de substituer une énergie à une autre, réduire les besoins constitue souvent le levier le plus direct. Sur un site industriel, l'efficacité énergétique mobilise la récupération de chaleur, l'optimisation des réseaux vapeur, l'amélioration des fours et chaudières, la réduction des pertes, le pilotage numérique et l'électrification de certains équipements. Ces démarches demandent une connaissance fine des procédés et la continuité du suivi, car les gains se dégradent si les conditions d'exploitation s'éloignent des réglages optimaux.

La trajectoire scopes 1 et 2 présentée par TotalEnergies place ainsi l'efficacité énergétique parmi les contributions majeures, avant les mécanismes de compensation. Ce positionnement est cohérent avec une logique chimique et industrielle : prévenir ou réduire une émission à la source est préférable lorsque cela est techniquement et économiquement possible. La recherche et développement complète cette démarche. Près d'un milliard d'euros est investi annuellement, avec une réorientation progressive vers les nouvelles énergies, les batteries et les thématiques santé-sécurité-environnement, dont le méthane, le CO_2, l'eau et la biodiversité.

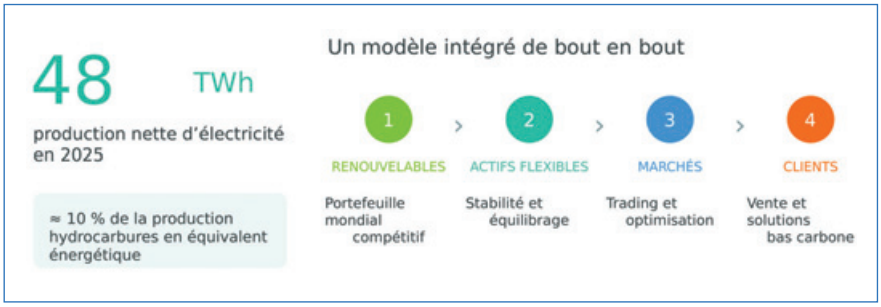


Figure 5 - Le modèle *Integrated Power* relie renouvelables, actifs flexibles, marchés et clients.

Les producteurs influencent l'offre, mais l'électrification, les réseaux, les équipements finaux et les cadres réglementaires déterminent aussi la demande. La stratégie revendique ainsi une ambition de neutralité carbone « ensemble avec la société ». Cette formulation rappelle une interdépendance réelle ; elle impose en retour de rendre les trajectoires lisibles et de publier des indicateurs permettant de distinguer émissions absolues, intensités, périmètres opérés et émissions liées à l'usage des produits.

Une allocation du capital qui matérialise les choix

Une stratégie énergétique se lit aussi dans l'investissement. TotalEnergies prévoit environ 15 milliards de dollars de dépenses d'investissement nettes en 2026, puis 14 à 16 milliards de dollars par an entre 2027 et 2030. Environ 4 milliards de dollars sont orientés vers les énergies bas carbone, notamment *Integrated Power* et les molécules bas carbone. Le reste finance l'entretien et le développement sélectif des activités pétrolières et gazières.

Cette allocation met en évidence la logique de transition retenue : financer simultanément le système actuel et sa transformation. Elle expose également le modèle à deux exigences. D'une part, les actifs fossiles nouveaux doivent rester compatibles avec une demande future incertaine et présenter une faible intensité opérationnelle. D'autre part, les investissements bas carbone doivent croître tout en atteignant des niveaux de rentabilité et de fiabilité suffisants. La discipline financière est donc la condition de la continuité de l'effort, mais elle peut aussi ralentir certaines filières lorsque leurs marchés restent immatures.

Résultats, objectifs et conditions de réussite

La stratégie « Plus d'énergies, moins d'émissions » doit être appréciée sur trois plans. Le premier est la performance déjà observée : 48 TWh d'électricité nette en 2025, une baisse de 65 % des émissions opérées de méthane depuis 2020 et des émissions opérées de scopes 1 et 2 ramenées à 33,1 Mt CO_2e. Le deuxième est la crédibilité des objectifs 2030, qui dépend de l'exécution industrielle des projets, de la disponibilité des infrastructures et de la discipline d'investissement. Le troisième concerne l'évolution du système énergétique dans son ensemble : politiques publiques, normes, prix du carbone, comportement des consommateurs et demande des clients.

Sur ce troisième point précisément : aucune entreprise ne peut, seule, déterminer la vitesse de transition du système.

Une transformation industrielle plutôt qu'une substitution instantanée

La stratégie de TotalEnergies assume une transition progressive. Les hydrocarbures continuent à répondre à une part importante des besoins actuels, tandis que l'électricité et les molécules bas carbone deviennent les principaux relais de croissance. La cohérence d'ensemble repose sur une idée simple mais exigeante : produire davantage d'énergie utile sans reproduire à l'identique le mix d'hier, et abaisser en parallèle les émissions des opérations et l'intensité carbone des ventes.

Les progrès sur le méthane démontrent qu'une action industrielle focalisée peut donner des résultats rapides. L'essor d'*Integrated Power* montre que la transformation ne consiste pas seulement à diversifier des actifs, mais à construire de nouvelles compétences d'intégration. L'efficacité énergétique, l'électrification, les biocarburants, l'hydrogène et le captage du CO_2 complètent cette évolution selon les usages. La crédibilité de la trajectoire dépendra de la réalisation des objectifs 2030, de la transparence des périmètres de mesure et de la capacité à accélérer les solutions bas carbone tout en assurant disponibilité et accessibilité de l'énergie.

Cet article fait suite à la conférence plénière donnée par Sylvain Panas dans le cadre des Journées de l'Innovation et de la Recherche pour l'Enseignement de la Chimie (JIREC) 2026 (voir numéro de septembre, https://new.societechimiquedefrance.fr/numero/n518-septembre-2026).

Notes et références

- TotalEnergies, *Transformation en compagnie multi-énergies, présentation générale*, août **2026**.
- TotalEnergies, *Sustainability & Climate 2026 Progress Report - Presentation*, 26 mars 2026.
- Agence internationale de l'énergie, *World Energy Outlook 2025*, AIE, Paris, **2025**.
- GIEC, *Climate Change 2023: Synthesis Report, Contribution des groupes de travail I, II et III au sixième, Rapport d'évaluation*, Genève, **2023**.



Agenda

4 novembre 2026

Chimie et cerveau

Paris

Voir *L'Act. Chim.* 518, p. 56.

https://fondation.maisondelachimie.com/colloque/chimieetcerveau

9 novembre 2026

Webinaire SECF

Substances et recyclage : le point de vue des développeurs, recycleurs, et transformateurs

Online

https://secf-expertschimie.org/2026/08/05/cycle-tracabilite-et-recyclage-des-plastiques-episode-4substances-et-recyclage-le-point-de-vue-desdeveloppeurs-recycleurs-et-transformateurs

16-18 novembre 2026

PhysChemCell 2026

Illuminer le vivant : outils chimiques et physiques innovants pour explorer la biologie

Paris

https://physchemcell26.sciencesconf.org

16-20 novembre 2026

Matériaux 2026

Grenoble

Voir *L'Act. Chim.* 512, p. 62.

https://materiaux2026.org

18-19 novembre 2026

Symposium ICSN 2026 – Pierre Potier

Gif-sur-Yvette

Voir *L'Act. Chim.* 518, p. 56.

https://icsn2026-potier.sciencesconf.org

18-20 novembre 2026

Bio&Chem 2026

Strasbourg

Voir p. 61.

https://biochem2026.sciencesconf.org

19 novembre 2026

Le numérique pour la chimie analytique

Paris

Voir *L'Act. Chim.* 516-517, p. 121.

www.sfds.asso.fr/fr/chimiometrie/788-le_numerique_pour_la_chimie_analytique

20 novembre 2026

Femmes, sciences et société : mobilisation générale !

Paris

www.eventbrite.fr/e/billets-femmes-sciences-et-societe-mobilisation-generale-1999754297937

2-4 décembre 2026

Journées Formulation 2026

Formulation et alimentation durables

Villeneuve d'Ascq

Voir p. 61.

https://jf2026.sciencesconf.org

3 décembre 2026

6e Rencontres du CNC

La chimie intégrative, du concept aux procédés pour les matériaux

Paris

www.cncchimie.org/rencontres-cnc-6

4 décembre 2026

Matinée d'hommage à Andrée Marquet

Paris

https://fondation.maisondelachimie.com/evenement/mmatinee-dhommage-a-andree-marquet

10 décembre 2026

Journée d'Automne de la division Chimie organique

Paris

Voir p. 61.

https://dco-automne2026.sciencesconf.org

10-13 décembre 2026

Village de la Chimie AURA

Stand dans le cadre du Mondial des Métiers

Lyon

www.mondial-metiers.com

28-29 janvier 2027

JCC 2027

Journées de la Chimie de Coordination

Rennes

Voir p. 62.

https://jcc2027.sciencesconf.org

16 février 2027

GWB2027

Global Women's Breakfast

https://iupac.org/gwb

16-18 mars 2027

Beyond Waste 2027

Recycling of materials from atoms to systems

Lille

https://beyondwaste2027.sciencesconf.org

5-7 avril 2027

Journées scientifiques SCF-Bretagne-Pays de Loire

Le Croisic

https://scf-bpl2026.sciencesconf.org

25-28 mai 2027

Supra@Angers 2027

Advances in supramolecular chemistry

Autrans

https://supra-angers-2027.cnrs.fr

31 mai-4 juin 2027

GECat 2027

Autrans

Voir p. 62.

https://gecat2027.sciencesconf.org

14-18 juin 2027

ACHEMA 2027

World Forum and Leading Show for Life Science and Process Industries

Francfort (Allemagne)

www.achema.de/en

14-18 juin 2027

ISGC 2027

The World Event in Sustainable Chemistry Research & Innovation With a special event dedicated exclusively to "Excellence Science in Africa"

La Rochelle

www.isgc-symposium.com

9-17 juillet 2027

IUPAC | CSC 2027 - Engaging Chemistry

54th IUPAC General Assembly and 51st World Chemistry Congress

Montréal (Canada)

iupac2027.org

De nombreuses autres manifestations vous attendent sur le site de la SCF : www.societechimiquedefrance.fr, rubrique Événements.

En direct de Chemistry Europe

Nomination du *Chemistry Europe Award* 2027

Chemistry Europe a lancé un appel à nominations pour le 3e *Chemistry Europe Award*. Ce prix prestigieux, doté de 10 000 €, distingue tous les deux ans des scientifiques ayant apporté des contributions exceptionnelles dans un domaine de la chimie, autour d'une thématique déterminée par le Chemistry Europe Council. Il a été décerné pour la première fois en 2023 à Bert Weckhuysen, professeur à l'Université d'Utrecht (Pays-Bas), dans le domaine de la chimie pour le développement durable, l'énergie, les matériaux et l'environnement, puis en 2025 à Stefan Grimme, professeur à l'Université de Bonn (Allemagne), en chimie théorique et computationnelle.

La thématique retenue pour 2027 est « **chimie médicinale et chimie aux interfaces avec le vivant** », avec un accent particulier sur la découverte de médicaments (*drug discovery*), la conception de médicaments (*drug design*) et les PROTAC. Les personnes nommées doivent avoir apporté des contributions majeures et avoir permis des avancées significatives dans notre compréhension de ce domaine.

Le prix peut être attribué aussi bien à des membres des sociétés de Chemistry Europe qu'à des non-membres, quelle que soit leur nationalité.

• Date limite d'envoi du dossier de nomination : **1er novembre 2026**.

www.chemistryviews.org/chemistry-europe-award

Prix des entités

Division Énergie

Prix Chercheur confirmé 2025



• Georgeta Postole

Georgeta Postole est maîtresse de conférences à l'Université Claude Bernard Lyon 1 et effectue ses activités de recherche à l'Institut de recherches sur la catalyse et l'environnement de Lyon (Ircelyon, UMR 5256). Cette distinction lui est décernée en reconnaissance de ses travaux sur la valorisation du biogaz pour la production d'hydrogène et sur le stockage de l'hydrogène.

Après un doctorat réalisé en 2002-2006 en cotutelle entre l'Académie Roumaine des Sciences et l'Université Claude Bernard Lyon 1 sur la catalyse par des métaux ou oxydes supportés sur nitrure de bore (Prix de la région Rhône-Alpes pour la meilleure thèse en cotutelle), elle a été chargée de recherche à l'Institut de Chimie Physique « Ilie Murgulescu » de l'Académie Roumaine des Sciences (ICF, groupe de Cinétique Chimique) avant de rejoindre l'Université Claude Bernard en 2010.

Ses travaux de recherche se focalisent sur la valorisation du biogaz pour la production d'hydrogène et sur le stockage de l'hydrogène dans des matériaux solides, en particulier le magnésium. Son domaine de compétences s'étend aussi au stockage thermochimique de la chaleur dans des silico-aluminates (zéolithes, MOF…) et à l'étude de l'électrocatalyse à l'anode des piles à combustible basse et haute température (PEMFC et SOFC). L'originalité de ces travaux repose sur l'utilisation de la calorimétrie d'adsorption et de techniques en température programmée pour le suivi des processus d'adsorption (CO, NH_3, CO_2, H_2S côté anode et NO_x, SO_2 côté cathode) sur des catalyseurs de platine supporté sur carbone.

Depuis 2016, elle est responsable du laboratoire de techniques calorimétriques qui sont couplées à de nombreux outils analytiques (chromatographes, spectromètres de masse, spectroscopies infrarouge et ultraviolet…). Elle organise régulièrement une formation proposée par CNRS Entreprises (Analyse thermique et couplages) dédiée aux techniciens, ingénieurs et chercheurs, et une école internationale d'été dédiée aux techniques calorimétriques et méthodes thermiques en science des matériaux.

Elle est co-auteure de plus de 70 articles dans des revues à comité de lecture et de trois chapitres de livre.

Prix Chercheur junior 2025



• Olivier Bardagot

Olivier Bardagot est chargé de recherche au CNRS à l'Institut de Chimie et Procédés pour l'Énergie, l'Environnement et la Santé (ICPEES, CNRS – Université de Strasbourg). Cette distinction vient récompenser ses travaux sur les polymères semi-conducteurs organiques pour la conversion et la récupération d'énergie et l'étude du dopage électrochimique de ces polymères vers des dispositifs de stockage d'énergie.

Après un doctorat au CEA/INAC – Université Grenoble Alpes, sous la direction de Renaud Demadrille, sur les semi-conducteurs organiques de type n pour la conversion d'énergie (2016-2019), il effectue un postdoctorat à l'université de Berne (Suisse) dans le groupe de Natalie Banerji, puis rejoint le CNRS en 2023 au sein du département Ingénierie des Polymères de l'ICPEES, équipe Polymères Fonctionnels et Nanofabrication.

Ses principaux axes de recherche sont le développement de polymères semi-conducteurs, la compréhension de leurs propriétés optoélectroniques et de leurs mécanismes de dopage, et leur intégration dans des dispositifs électroniques. Ces matériaux innovants sont particulièrement prometteurs pour améliorer la performance de trois dispositifs reliés à l'énergie, à savoir les dispositifs *thermoélectriques organiques* pour la récupération d'énergie thermique et sa conversion en électricité, les cellules *photovoltaïques organiques* pour la conversion directe d'énergie solaire en électricité, et ses travaux actuels sur les polymères à conduction mixte ionique-électronique pourraient contribuer au développement de *batteries et supercondensateurs* pour le stockage réversible d'énergie électrique.

Prix postdoctorant 2025



• Ajeet Singh

Après son doctorat obtenu en 2019 (Indian Institute of Technology, Indore), Ajeet Singh a poursuivi en postdoctorat à l'université de Jérusalem (2019) et à l'Institut Max Planck de Müllheim/Ruhr – Chemical Energy Conversion (2020-2022) avant de venir continuer sa recherche en France, au Laboratoire d'Électrochimie Moléculaire (UMR 7591 CNRS, Université Paris Cité).
En 2023, il rejoint l'équipe de Marc Robert comme postdoctorant (Institut Parisien de Chimie Moléculaire, UMR 8232 CNRS, Sorbonne Université), où ses recherches ont grandement contribué à ouvrir la voie à la conversion électrocatalytique contrôlée de CO en formaldéhyde, avec un catalyseur moléculaire de phtalocyanine de cobalt, puis à la réduction électrochimique de CO en sucres, *via* la polymérisation du formaldéhyde en sucres C5 et C6, exclusivement. Ces travaux hautement originaux ouvrent la voie à la synthèse contrôlée et énergétiquement efficace de produits chimiques complexes et de haute valeur ajoutée à partir de simples molécules C1 (CO_2 et CO) et d'électricité, avec pour contexte et perspectives la décarbonation du secteur de la chimie de synthèse.
Depuis septembre 2025, il est postdoctorant au LCMCE – IRAMIS, CEA Paris-Saclay.

Prix de thèse 2025



• Alexandre Terry

Alexandre Terry a effectué sa thèse de 2021 à 2024 en cotutelle entre Université de Montréal et Université de Bonn, et Le Mans Université, sous la codirection de Nikolay Kornienko (Kornienko Lab, Univ. Montréal puis Univ. Bonn) et Jérôme Lhoste (Institut des Molécules et Matériaux du Mans, Le Mans Université, UMR 6283).
Cette distinction vient récompenser ses travaux sur les « Nouveaux matériaux oxyfluorés à base de métaux 3d mixtes comme catalyseurs anodiques pour l'électrolyse de l'eau : de l'élaboration à l'étude mécanistique ». Lors de son doctorat, il a développé de nouveaux matériaux oxyfluorés à base de métaux de transition abondants (fer, cobalt, nickel) et étudié ceux-ci en tant que catalyseurs anodiques pour l'électrolyse de l'eau en milieu alcalin. Le catalyseur le plus performant a également fait l'objet d'une étude approfondie à l'aide de méthodes électroanalytiques, par spectroscopies infrarouge et Raman *in situ/operando*, ainsi que par spectrométrie de masse, afin de comprendre l'origine de son activité électrocatalytique et d'élucider le mécanisme d'oxydation de l'eau à la surface de ce matériau.
Depuis avril 2025, il est postdoctorant au LRCS d'Amiens, où il travaille sur la synthèse et la caractérisation de nouveaux matériaux anodiques pour batteries Li-ion haute puissance.

Division Chimie de coordination

Prix Chercheur confirmé 2026

• Claude Gros

Claude Gros est professeur à l'Université de Bourgogne à Dijon, rattaché à l'UFR des Sciences de Santé, circonscription Pharmacie, pour ses enseignements et à l'Institut de Chimie



Moléculaire (ICMUB, UMR CNRS 6302) pour sa partie recherche.
Après un doctorat à l'Université de Bourgogne en 1995 sous la direction de Roger Guilard et un postdoctorat dans le laboratoire de Kevin M. Smith (UCDavis, E.-U.), où il s'est intéressé à la chimie des chlorines et des pyrroloporphyrines, il rejoint l'Université de Bourgogne en tant que maître de conférences en 1996.
Ses travaux actuels portent notamment sur la synthèse et la réactivité de corroles, porphyrines et autres dérivés macrocycliques, ainsi que de leurs complexes métalliques. Les applications concernent deux principaux domaines de recherche : la chimie de coordination appliquée à l'environnement pour la détection ou l'activation de petites molécules gazeuses, en particulier la détection de CO et de NH_3, et la chimie de coordination pour la santé avec le développement de nouveaux agents antiviraux et la synthèse de sondes multimodales pour l'imagerie médicale.
Claude Gros a développé de nombreuses collaborations à l'international avec notamment les États-Unis (Karl. M. Kadish, UH, Houston), la Chine (Hai-Jun Xu, Nanjing) et plus récemment la Norvège (Abhik Ghosh, UiT, Tromsø ainsi que Per-Anders Hansen, IFE, et Ola Nilsen, UiO, Oslo). Ces dernières collaborations ont été rendues possibles grâce notamment aux différents programmes Åsgard de l'Institut français de Norvège. Il a effectué plusieurs séjours à Hong Kong dans le cadre du programme franco-hongkongais Procore.
Il est actuellement directeur du GDR CNRS MAPYRO (Macrocycles pyrroliques) et a rédigé huit ouvrages de chimie pour les étudiants de 1ère année des études de santé (PASS/LAS) (éditions Ellipses). Membre résidant à l'Académie des Sciences, Arts et Belles-Lettres de Dijon, il est vice-président de la Commission des sciences après avoir assuré deux mandats de président. Chaque année, il est en charge de l'organisation de neuf communications scientifiques.
Membre fidèle de la SCF depuis plus de 25 ans, Claude Gros a été président de la section régionale Bourgogne Franche-Comté de 2012 à 2018 et vice-président de 2018 à 2022.

Prix Jeune chercheur 2026



• Alexandre Abhervé

Alexandre Abhervé est chargé de recherche au laboratoire MOLTECH-Anjou, Université d'Angers.
Après un doctorat en chimie à l'Instituto de Ciencia Molecular (ICMol, Universidad de Valencia, Espagne) obtenu en 2015, sous la direction d'Eugenio Coronado et Miguel Clemente León, sur la préparation de complexes multifonctionnels et polymères de coordination exfoliés présentant des propriétés de transition de spin, son expérience postdoctorale dans l'équipe de Narcis Avarvari au laboratoire MOLTECH-Anjou à Angers lui a permis d'orienter ses recherches vers la synthèse de ligands chiraux électroactifs ou luminescents, pour le développement de complexes de coordination conducteurs ou émettant de la lumière circulairement polarisée (CPL).
Depuis son recrutement au CNRS en 2022, ses recherches se sont orientées sur les pérovskites halogénées chirales, plus particulièrement sur la synthèse de cations organiques chiraux originaux ainsi que de pérovskites doubles sans plomb. L'objectif de ses travaux consiste à évaluer le potentiel

de cette nouvelle famille de semiconducteurs chiraux pour la polarisation de la lumière, en étudiant notamment leurs propriétés de dichroïsme circulaire (CD) et de CPL, ainsi que du courant électrique, en exploitant la sélectivité de spin induite par la chiralité (effet CISS). L'intérêt pour le développement de ces matériaux est à la fois fondamental et applicatif, afin de comprendre l'origine de l'effet CISS et le mécanisme de transfert de chiralité du cation vers le réseau inorganique, mais également pour utiliser ces phénomènes de polarisation dans des dispositifs optoélectroniques et spintroniques.

Prix Tremplin 2026

Ce nouveau prix s'adresse à des jeunes chercheurs et chercheuses en début de carrière (début de thèse depuis moins de douze ans au 1er janvier de l'année du prix).



• Lucile Chatelain

Lucile Chatelain est maîtresse de conférences au laboratoire Chimie, Électrochimie Moléculaires et Chimie Analytique (CEMCA - CNRS UMR 6521) à Brest.

Après des études à l'École Normale Supérieure de Lyon et l'obtention de l'agrégation de chimie en 2012, elle a effectué un doctorat, soutenu en 2016, sous la codirection de Marinella Mazzanti (CEA Grenoble/Université Grenoble Alpes et École polytechnique Fédérale de Lausanne, Suisse) et Philippe Moisy (CEA Marcoule). Ses travaux ont porté sur la conception d'assemblages polymétalliques d'uranium pour le développement de molécules aimants, notamment à partir d'uranyle(V) et de métaux de transition (Mn, Fe, Co, Ni). Parallèlement, elle a étudié l'activation de petites molécules inertes comme CO_2 et N_2 par des complexes nitrures d'uranium à bas degré d'oxydation. Lors de son postdoctorat à l'Université de Manchester (R.-U.) dans le groupe de Stephen Liddle, elle a étudié la réactivité de complexes nitrure terminal d'uranium avec H_2.

Obtenant un poste de maîtresse de conférences en 2018 au CEMCA, elle s'est intéressée aux complexes fer-soufre, bioinspirés des sites actifs des métalloenzymes hydrogénases. En 2020, elle a obtenu une ANR JCJC pour étudier l'activation de H_2 par des paires de Lewis frustrées bioinspirées, formées par des complexes organométalliques [$Fe^{I}Fe^{I}$] et un borane, jouant respectivement le rôle de base et d'acide de Lewis. Elle est également coordinatrice d'un nouveau projet ANR PRC financé en 2026, qui aura pour but d'explorer la réactivité de complexes {$FeMS_2$} (M : Mn - Ni) supportés par des ligands redox actifs dérivés d'heptazine pour l'HER.

Division Chimie physique

Prix Chercheuse confirmée/Chercheur confirmé 2026



• Isabelle Kleiner

Isabelle Kleiner est directrice de recherche au CNRS dans le Laboratoire Interuniversitaire des Systèmes Atmosphériques (LISA, Université Paris-Est Créteil - Université Paris Cité). Elle a obtenu son doctorat à l'Université Libre de Bruxelles et effectué un postdoctorat au National Institute for Standards and Technology (NIST, E.-U.).

Ses travaux actuels portent sur la spectroscopie en phase gazeuse de molécules présentant un mouvement de grande amplitude, choisies tant pour leur intérêt en chimie physique fondamentale que pour leurs applications astrophysiques, atmosphériques et biologiques. En particulier, elle a contribué au développement de modèles de chimie quantique pour le calcul des spectres moléculaires, qui sont ensuite traduits en codes informatiques. Ce travail permet de décrire les spectres en phase gazeuse des molécules flexibles présentant des mouvements de grande amplitude tels que la rotation interne des groupes méthyle et l'inversion et conduit à des prédictions exactes des spectres dans les domaines micro-ondes et infrarouges. L'ensemble de ses logiciels est utilisé dans de nombreux laboratoires afin de modéliser la dynamique de rotation interne des groupes méthyle et pour interpréter les données expérimentales micro-ondes, millimétriques, térahertz ou infrarouges enregistrées à haute résolution.

Menés dans le cadre de diverses collaborations nationales, européennes et internationales, les travaux d'Isabelle Kleiner ont permis la détection de plusieurs molécules dans le milieu interstellaire et ont abouti à de nombreuses publications dans le domaine de la spectroscopie moléculaire à haute résolution. Très impliquée dans la formation de jeunes chercheuses et chercheurs en spectroscopie moléculaire, elle a organisé plusieurs écoles thématiques internationales de haut niveau et a participé au montage et à la codirection du GdR SPECMO. Lauréate du prix Ioannes Marcus Marci Medal de la « Ioannes Marcus Marci Spectroscopic Society » (Rép. Tchèque) en 2022 et du prix franco-allemand Gentner-Kastler en 2024, elle a été présidente des Journées de Spectroscopie Moléculaire de 2014 à 2019 et est membre du comité scientifique international du « Colloquium on High Resolution Molecular Spectroscopy » (HRMS) depuis 2021.

• Frédéric Kanoufi



Ingénieur de l'ESPCI Paris, Frédéric Kanoufi obtient un doctorat en électrochimie à l'Université Paris Diderot en 1998, puis effectue un séjour postdoctoral à l'Université du Texas à Austin, dans le groupe d'Allen J. Bard. Recruté au CNRS en 1999, il est directeur de recherche et a mené ses travaux entre l'Université Paris Sciences et Lettres (PSL) et l'Université Paris Cité.

Ses recherches sont à la fois mécanistiques et méthodologiques et cherchent à comprendre où, quand et comment se produisent les réactions électrochimiques à des interfaces hétérogènes. Une question les guide : la réactivité d'un domaine actif tient-elle à ses propriétés intrinsèques ou à son environnement local ? Pour y accéder, il cherche à imager l'électrochimie à l'échelle nanométrique pour obtenir une mesure qui rend compte des processus locaux, invisibles à la mesure globale du courant qui traverse une électrode macroscopique. Il développe pour cela des approches *in situ* et *operando* qui associent des sondes locales électrochimiques (microélectrodes, micro- et nanopipettes, ou confinement de la réaction en gouttelette) et une imagerie corrélative construite autour de microscopies optiques quantitatives (imagerie de masse optique). Ces méthodes s'appuient sur la modélisation multiphysique et sur des approches algorithmiques d'analyse et de reconstruction d'images pour extraire des grandeurs quantitatives et interpréter les mécanismes réactionnels. Elles permettent de suivre la réactivité d'objets individuels, les fronts de transformation ou les événements électrochimiques locaux.

Ces développements sont appliqués à la physico-chimie des interfaces et à la réactivité de nano-objets, à la corrosion, ainsi qu'au fonctionnement et au vieillissement des matériaux pour le stockage et la conversion de l'énergie.

Prix Jeune chercheur 2026



• Guillaume Stirnemann

Guillaume Stirnemann est directeur de recherche au CNRS au laboratoire Chimie Physique et Chimie pour le Vivant (UMR 8228 Sorbonne Université/CNRS/ENS-PSL) et professeur attaché à l'ENS-PSL.

Ses recherches se focalisent sur la compréhension mécanistique de processus chimiques et biochimiques à l'aide d'outils de la simulation moléculaire et de l'intelligence artificielle. Il est notamment impliqué dans le développement de nouvelles approches pour les simulations de réactivité chimique et l'échantillonnage de l'espace des phases chimique et biophysique.

Prix Instrumentation et Innovation 2026

Ce prix bénéficie du soutien financier de sponsors industriels. Cette année, il s'agit des sociétés Horiba et Physik Instrumente.



• Sandrine Lyonnard

Sandrine Lyonnard est physicienne, spécialiste des techniques de diffusion de neutrons et de rayons X pour la caractérisation de la structure et de la dynamique des matériaux pour l'énergie.

Ces dernières années, ses recherches se sont concentrées sur le développement de dispositifs et de méthodes *operando* pour l'étude des piles à combustible et des batteries. Son groupe développe notamment des techniques de diffraction des rayons X et de diffusion aux petits angles, incluant des mesures en tomographie, pour analyser les mécanismes réactionnels et les phénomènes de dégradation dans les matériaux de batteries Li-ion et Na-ion, de l'échelle de la particule jusqu'à celles du composant et de la cellule.

Directrice de recherche CEA, professeure invitée à l'Université d'Uppsala (Suède), elle coordonne à Grenoble le « X-ray European Battery Hub » (ESRF) et le « Neutron Battery Hub » (ILL), qui développent de nouveaux modes d'accès et méthodologies pour la caractérisation corrélative multi-techniques multi-échelles.



• Emmanuel Mousset

Emmanuel Mousset est chargé de recherche au CNRS au laboratoire Génie des Procédés Environnement Agroalimentaire (GEPEA, UMR CNRS 6144), spécialisé en génie électrochimique.

Ses recherches portent sur des systèmes électrochimiques innovants pour le traitement des eaux usées, la réutilisation de l'eau et la valorisation des ressources (inorganiques, organiques et énergétiques), en combinant le design de réacteurs avec les cinétiques et réactivités (électro)chimiques, ainsi que le changement d'échelle des procédés. Il développe des solutions durables pour l'élimination de polluants persistants et la récupération de ressources à haute valeur ajoutée à partir des eaux usées. Il est à l'origine du concept d'électro-mélange réactif, dont le système « ElectRotate » associé est développé avec la société Treewater.

Ses travaux ont été distingués par le prix « Green Electrochemistry » (International Society of Electrochemistry, 2018), la médaille Carl Wagner d'excellence en génie électrochimique (Fédération européenne de génie chimique, 2020) et le prix Jeune chercheur de la section française de l'International Society of Electrochemistry et de la subdivision Électrochimie de la SCF (2022).

Prix de thèse 2026



• Arthur Langlard

Après un magistère de physico-chimie moléculaire à l'Université Paris-Saclay, Arthur Langlard a réalisé sa thèse au laboratoire Chimie Et Interdisciplinarité, Synthèse, Analyse, Modélisation (CEISAM, UMR CNRS 6230) à Nantes sous la direction de Mohammed Boujtita et Estelle Lebègue.

Ses travaux ont porté sur l'électrochimie des nano-impacts, un champ de recherche où les propriétés électrochimiques d'objets microscopiques sont étudiées individuellement lors de leur contact avec une électrode, plutôt qu'en tant qu'ensemble de particules en solution. Il a développé une méthode de traitement du signal permettant à la fois de réduire le niveau de bruit et d'extraire la taille des particules responsables de chaque impact. Le couplage de cette détection électrochimique avec un dispositif d'ultramicroscopie a permis de visualiser les trajectoires de particules en solution lors de la polarisation de l'électrode et d'expliquer la présence de collisions en fonction des conditions expérimentales. En simulant le processus de diffusion à l'aide d'un calculateur analogique, il a montré qu'un impact de particules à la surface de l'électrode pouvait causer une réorganisation des espèces en solution, qui se manifeste alors comme une légère distorsion dans le signal électrochimique par rapport à l'allure attendue des variations de courant. En collaboration avec l'équipe d'Andrew G. Ewing (Univ. de Göteborg, Suède), il a également pu étudier électrochimiquement la perméabilisation de membranes cellulaires par des toxines à l'échelle de la cellule unique.

Il est actuellement postdoctorant dans l'équipe de Csaba Forró (Biohub, Chicago, E.-U.), où il développe de nouvelles techniques électrochimiques. Celles-ci, adaptées aux systèmes générant des courants brefs et de faible intensité, sont destinées à étudier les mécanismes mis en jeu dans les biocapteurs à aptamères.



• Étienne Rouquet

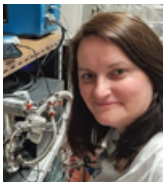
Après un magistère de physico-chimie moléculaire de l'Université Paris-Saclay et l'École Normale Supérieure Paris-Saclay, Étienne Rouquet a rejoint le Master 2 Chimie Analytique, Physique et Théorique de Sorbonne Université. Durant ses études, il a réalisé deux stages de recherche au sein de l'Institut des Sciences Moléculaires d'Orsay (ISMO) et de la ligne de lumière DESIRS du Synchrotron SOLEIL, où il s'est formé aux techniques de spectroscopie chiroptiques, en particulier le dichroïsme circulaire de photoélectrons (PECD) et la spectroscopie de photoélectrons en général. Durant ses travaux de thèse, en collaboration dans ces deux laboratoires, sous la direction d'Anne Zehnacker (ISMO) et Laurent Nahon (SOLEIL), il a développé de nouvelles méthodes pour l'étude du PECD en phase gaz, avec un accent sur la sélectivité en conformère et la chiralité induite.

Dernièrement, il a rejoint le Fritz-Haber-Institut de Berlin et le Physikalisches Institut de l'Université de Münster en Allemagne en tant que chercheur postdoctoral. Il s'intéresse à la spectroscopie de photoélectrons et au PECD en phase liquide.

Subdivision Électrochimie

Prix Jeune chercheuse/Jeune chercheur 2026

Ces prix sont sponsorisés par la subdivision Électrochimie de la DCP et l'ISE (International Society of Electrochemistry).



• Vasilica Badets

Docteure en chimie de l'Université Via Domitia de Perpignan et de l'Université Babes-Bolyai de Cluj-Napoca (Roumanie), Vasilica Badets est maîtresse de conférences au Laboratoire Électrochimie et Chimie Physique du Corps Solide (LECPCS, Université de Strasbourg).

Après son doctorat dédié au développement de biocapteurs et immunocapteurs pour diverses applications en bioélectrochimie, elle a effectué cinq années de stages postdoctoraux qui l'ont conduite à développer des travaux dans le domaine de l'électrocatalyse et de l'électroanalyse.

Ses travaux actuels sont basés sur la spectrométrie de masse différentielle couplée à l'électrochimie (DEMS). Elle s'intéresse à l'étude des catalyseurs métalliques macroporeux pour la réduction des nitrites, l'oxydation des petites molécules organiques et, depuis peu, au recyclage électrochimique des polymères.



• Junsoo Han

Junsoo Han est maître de conférences à Sorbonne Université depuis 2021 au Laboratoire Interfaces et Systèmes Électrochimiques (LISE).

Ses recherches portent sur le développement de nouvelles méthodologies d'analyse électrochimique résolue par élément pour l'étude de la corrosion, des matériaux fonctionnels et des systèmes électrochimiques complexes. Ses travaux visent à développer des approches innovantes d'électrochimie analytique permettant de suivre en temps réel les mécanismes de dégradation des matériaux avec une résolution élémentaire *via* AESEC (« *atomic emission spectroelectrochemistry* »). En combinant l'électrochimie à des techniques spectroscopiques avancées, les recherches de Junsoo Han contribuent à une meilleure compréhension des phénomènes de corrosion et de passivation, avec des applications dans les matériaux pour l'énergie, le nucléaire et les technologies durables.

Manifestations

18-20 novembre 2026

Bio&Chem

Strasbourg

L'École supérieure de biotechnologie de Strasbourg (ESBS) accueille la 4e édition du forum Bio&Chem. Au programme notamment : sessions plénières sur la bio-imagerie, les sondes chimiques et le diagnostic, ainsi que la conception de médicaments, et des tables rondes sur les technologies vertes, la communication scientifique, l'interdisciplinarité et l'IA.

Cet événement, organisé par la section Alsace de la SCF, la Société de Biologie de Strasbourg et l'Université de Strasbourg, permet aux acteurs de la biotechnologie et de la chimie de se retrouver, d'échanger des idées, d'établir de potentielles collaborations ou encore de favoriser le développement de projets nationaux ou européens.

• Date limite de soumission de poster : **7 novembre 2026**.

https://biochem2026.sciencesconf.org

2-4 décembre 2026

Journées Formulation 2026

Villeneuve d'Ascq

Les Journées Formulation, organisées chaque année, constituent un moment privilégié pour explorer les avancées techniques et scientifiques les plus récentes. L'édition 2026 sera consacrée à un enjeu majeur : « **Formulation et Alimentation durable** », et réunira la communauté scientifique et industrielle autour de conférences, posters, débats et échanges stimulants. Au programme, plusieurs thématiques au cœur de l'actualité : protéines végétales et alternatives (algues, insectes, laitières, cellulaires…) ; ingrédients et aliments fonctionnels ; physicochimie des produits et matières premières ; formulation et procédés ; valorisation des sous/co-produits – circularité ; stratégies de réduction de l'empreinte carbone ; emballage et écoconception ; apports des outils numériques et de l'IA ; nutraceutique.

Le congrès s'ouvrira par la **conférence tout public gratuite « Le plastique dans l'alimentation : usages et conséquences » par Valérie Guillard** (sur inscription) : le plastique tient une grande place dans notre alimentation, à tel point que nous en sommes devenus totalement dépendant. Il joue un rôle indéniable dans la conservation des produits et la réduction des pertes alimentaires. Cependant, il contamine nos aliments et nos organismes et plus largement tous nos écosystèmes. Comment sortir de cette dépendance ? L'objectif de cette conférence est de mettre en lumière les différents enjeux entourant l'utilisation du plastique dans les filières agricoles et agroalimentaires, de faire un état des lieux des conséquences de cette dépendance et de réfléchir ensemble aux moyens d'y remédier.

• https://jf2026.sciencesconf.org

10 décembre 2026

Journée d'Automne de la DCO 2026

Paris



À l'occasion de la prochaine Journée d'Automne organisée traditionnellement par la division Chimie Organique, vous pourrez découvrir les travaux récents de Zacharias Amara (EurJOC-SCF Award 2026, CNAM Paris), Olivier Charon (Prix de thèse Dina Surdin 2026, ESPCI Paris), Maria Duca (Université Côte d'Azur), Abdul-Halim Obeid (Prix de thèse Henri Kagan 2026, Paris Saclay), Eugénie Romero-Laboureur (Prix Marc Julia

La SCF fait évoluer ses outils numériques

Depuis plusieurs mois, la Société Chimique de France a engagé une refonte importante de ses outils numériques, avec la rénovation de son site internet et le développement d'une nouvelle version de son logiciel de gestion des adhérents.
Cette refonte répond à plusieurs objectifs : **améliorer la visibilité de la SCF sur le web, mieux valoriser ses activités et celles de ses entités, simplifier les démarches d'adhésion et de gestion des adhérents**, mais également adapter nos outils aux évolutions réglementaires et techniques, notamment en matière de facturation automatisée et de respect du RGPD.
Le nouveau site internet de la SCF est en cours de développement et de transfert des données depuis l'ancien site. Cette étape est nécessaire pour assurer la continuité des informations et des services proposés.
Le site de *L'Actualité Chimique* fera, quant à lui, l'objet d'un développement indépendant. Comme cela a déjà été le cas il y a quelques années, la revue disposera ainsi de son propre site internet.
En parallèle, une nouvelle version du logiciel de gestion des adhérents est également en cours de développement. Elle doit notamment permettre de simplifier et de moderniser la gestion des adhésions et des informations liées aux membres de la SCF, tout en intégrant les nouvelles contraintes réglementaires.
Les premiers tests sont actuellement menés au sein du Bureau national et de la Commission informatique du Conseil d'administration de la SCF. Dans une prochaine étape, le nouvel outil sera proposé à un groupe d'adhérents volontaires afin de recueillir leurs retours et de poursuivre son amélioration avant son déploiement plus large.
Ces différents projets constituent une évolution importante des outils de la SCF. Ils sont menés progressivement afin de garantir la fiabilité des données et des services, tout en prenant en compte les besoins des différentes composantes de notre communauté.

2026, CEA Saclay), Peter Schreiner (Justus Liebig Universität Giessen) et Sébastien Ulrich (Prix Jean-Marie Lehn 2026, IBMM Montpellier).
Comme chaque année, des possibilités de communications orales sont offertes à nos collègues en poste permanent depuis moins de dix ans.
• Date limite de candidature : **31 octobre 2026**.
https://dco-automne2026.sciencesconf.org

28-29 janvier 2027
JCC 2027
Journées de la division Chimie de Coordination
Rennes



Les Journées de la Chimie de Coordination sont traditionnellement organisées par la division Chimie de Coordination (DCC) de la SCF et rassemblent près de 150 participants.
La DCC est au carrefour de nombreux domaines de recherche d'intérêt majeur tels que la catalyse, la chimie physique, la chimie bioorganique et bioinorganique, l'électrochimie, la photochimie, le magnétisme etc., autant de disciplines qui seront représentées pendant ce congrès.
Cette rencontre représente un moment privilégié. Si elle est vouée à permettre aux différents membres de nos communautés de partager les résultats de leur recherche et d'initier des collaborations, c'est aussi un rendez-vous important pour les doctorants et chercheurs postdoctorants qui souhaitent présenter leur travail et étendre leur réseau de contacts au niveau national.
Conférenciers invités : Alexandre Abhervé (MOLTECH Angers), Matteo Atzori (LNCMI Grenoble), Lucile Chatelain (CEMCA Brest), Charlène Esmieu (LCC Toulouse), Claire Fave (IPCM Paris) et Claude P. Gros (ICMUB Dijon).
La DCC attribuera **huit bourses** à des jeunes chercheuses/chercheurs, doctorant·es, postdoctorant·es pour participer au congrès (date limite pour candidater : **23 octobre 2026 à midi**).
• Date limite de soumission des résumés : **20 novembre 2026**.
https://jcc2027.sciencesconf.org

31 mai-4 juin 2027
GECAT 2027
Autrans

En 2027, le GECAT – Groupe d'Étude en Catalyse (GECat), comité de la division Catalyse de la SCF – fêtera ses 50 ans !
Ce groupe organise des réunions thématiques annuelles dans le but de fédérer la communauté de catalyse francophone, de promouvoir les échanges entre chercheurs et de favoriser l'intégration des jeunes chercheurs.
Pour cette édition anniversaire, trois grands thèmes seront à l'honneur : ressources alternatives pour la chimie ; caractérisation *in situ*/*operando* ; compréhension des sites actifs et mécanismes réactionnels. Une demi-journée thématique « IA & Catalyse » sera également proposée.
• Date limite de soumission des résumés : **2 décembre 2026**.
https://gecat2027.sciencesconf.org

Une année passe vite…

Pensez à renouveler votre adhésion

https://new.societechimiquedefrance.fr/adherer-a-la-scf/adhesion-en-ligne

Cycloadditions énantiosélectives impliquant des 2-pyrones

Un outil de choix pour la synthèse de molécules complexes

Céline BOUCHEL et Aurélien de la TORRE

https://doi.org/10.63133/scf.act-chim.2026.519.02

Les pyrones dans la nature et en synthèse

Les 2-pyrones sont des composés hétérocycliques comportant un motif diène et une fonction lactone. Ces hétérocycles sont présents dans plusieurs produits naturels comme la yangonine, produite par les racines de kava et agoniste des récepteurs CB1, mais aussi des polymères tels que des polyesters et des matériaux π-conjugués (*figure 1*) [1-3]. En outre, ces composés sont des briques moléculaires intéressantes : la 2-pyrone peut être considérée comme un diène appauvri en électrons, d'autant plus lorsqu'elle est substituée par un groupement électro-attracteur en position 3 ou 5. Ainsi, cette 2-pyrone peut être impliquée dans des réactions de Diels-Alder à demande électronique inverse, en présence de diénophiles riches en électrons. Cette approche a été largement utilisée pour la synthèse de structures complexes, bien que généralement sous forme racémique [4].

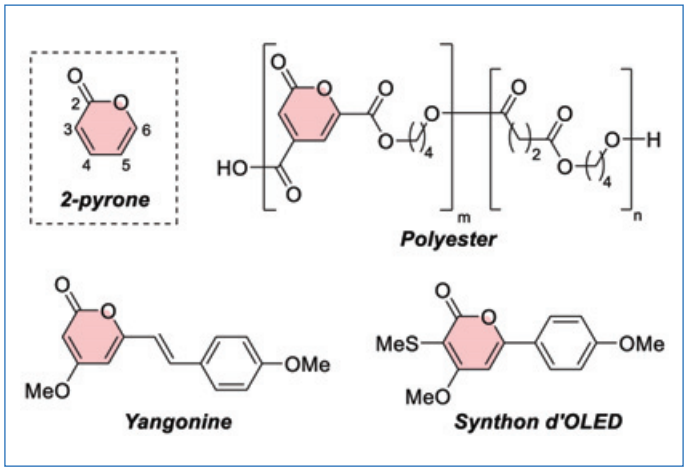


Figure 1 - Structure de 2-pyrones dans des produits naturels, polymères et matériaux π-conjugués.

Premiers exemples en catalyse énantiosélective et développements récents

Les premiers exemples de cycloaddition énantiosélective impliquant des 2-pyrones ont été décrits dans les années 1990 par les groupes de István Markó et Gary Posner, en employant des acides de Lewis à base d'ytterbium et de titane et des ligands chiraux de type BINOL ou TADDOL [5,6]. Toutefois, ces méthodes se limitaient à l'utilisation d'éthers ou thioéthers vinyliques non substitués en tant que diénophiles, et les excès énantiomériques n'atteignaient des niveaux intéressants que pour un nombre limité de substrats. Plus récemment, le groupe de Cai a développé plusieurs méthodes employant un acide de Lewis à base d'ytterbium en présence d'un ligand BINOL plus élaboré. Ces travaux ont permis de réaliser ce type de cycloaddition avec d'excellents excès énantiomériques en présence de substrats plus complexes, bien que toujours cycliques [7,8]. Dans le cadre d'un projet de synthèse totale, nous nous sommes intéressés au cas des éthers d'énol acycliques, et avons montré que ces composés pouvaient être impliqués dans des cycloadditions avec des 2-pyrones en présence d'un catalyseur de cuivre(II) cationique et d'un ligand bisoxazolidine chiral [9]. Une étude mécanistique impliquant l'observation d'épimérisation et des calculs DFT a permis de démontrer que le mécanisme de cette réaction se déroulait en deux étapes, contrairement aux réactions de Diels-Alder classiques qui sont des réactions péricycliques [10]. Dans notre cas, la pyrone activée par l'acide de Lewis joue dans un premier temps le rôle d'électrophile, subissant une addition 1,4 de la part de l'éther d'énol avant de réagir en tant que nucléophile sur l'oxonium issu de la première étape. La première étape est énantiodéterminante. En effet, l'énantiosélectivité est régie par la face d'approche de l'éther d'énol par rapport à la pyrone. Celle-ci est controlée grâce au ligand chiral qui bloque l'accès à une des deux faces de la pyrone. La présence de la fonction ester en position 3 de la pyrone est alors essentielle pour permettre la coordination au complexe de cuivre.

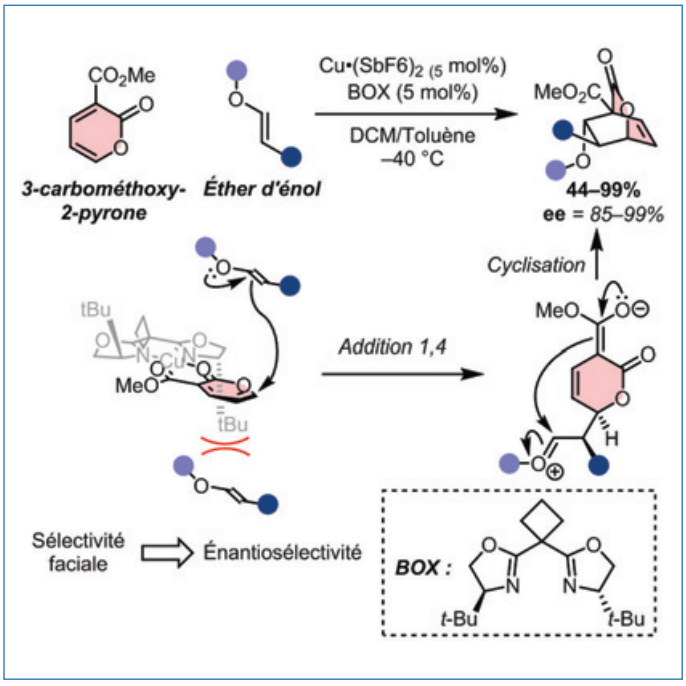


Figure 2 - Cycloaddition de Diels-Alder à demande électronique inverse énantiosélective.

Application à la synthèse totale de la lucidumone

Ce type de cycloaddition a été mis en application dans la synthèse totale de la lucidumone, un méroterpénoïde issu du champignon *Ganoderma lucidum* possédant des propriétés inhibitrices de COX-2, impliquée dans les mécanismes inflammatoires [11]. Nous avons réalisé la synthèse énantiosélective de cette molécule naturelle en employant la méthode de cycloaddition développée au laboratoire. Ainsi, une lactone bicyclique comportant deux fonctions alcool protégées a pu être synthétisée de façon énantiosélective [12]. Après plusieurs étapes de synthèse, une indénone a été introduite sur la fonction alcool primaire. En chauffant ce composé dans le chlorobenzène, une décarboxylation a lieu via une rétro-cycloaddition [4+2]. La fonction cyclohexadiène résultante subit alors une réaction de cycloaddition [4+2] intramoléculaire avec l'indénone. La lucidumone est ensuite obtenue après quelques étapes d'ajustement redox et de déprotection.

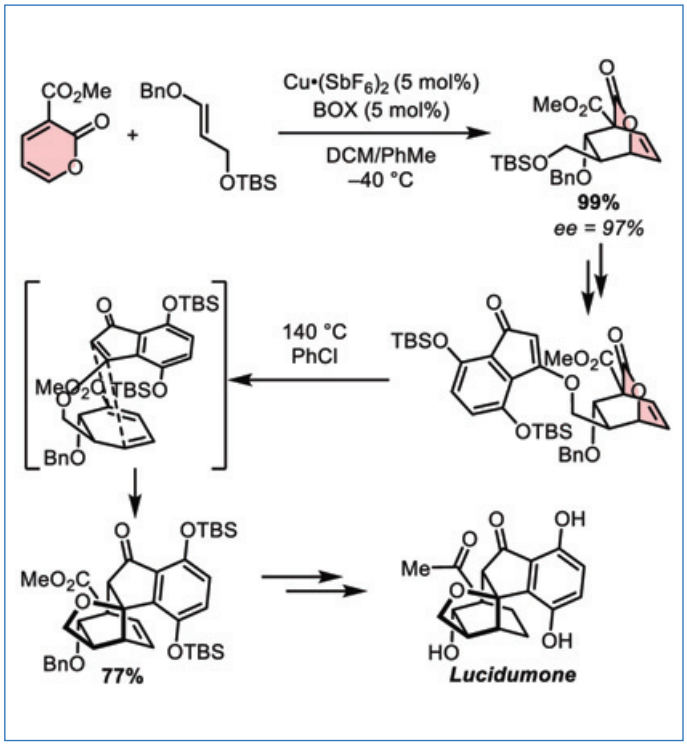


Figure 3 - Synthèse de la lucidumone.

Dans cette synthèse, la cycloaddition impliquant la pyrone est cruciale : elle permet une synthèse énantiosélective puisque tous les centres stéréogènes sont controlés par cette étape. En outre, la lactone bicyclique qui en résulte peut être considérée comme un cyclohexadiène masqué, qui peut être généré par chauffage *via* une rétro-cycloaddition impliquant une décarboxylation.

Ces travaux montrent le potentiel de cette réaction pour la synthèse de molécules complexes. De plus, la compréhension du mécanisme en deux étapes permet en outre d'envisager d'autres réactions de cycloaddition formelle pour accéder à une plus grande diversité moléculaire.

[1] A. Ligresti, R. Villano, M. Allarà, I. Ujváry, V. Di Marzo, Kavalactones and the endocannabinoid system: The plant-derived yangonin is a novel CB_1 receptor ligand, *Pharmacol. Res.*, **2012**, *66*, p. 163-69, https://doi.org/10.1016/j.phrs.2012.04.003

[2] T. Michinobu *et al.*, Fusible, Elastic, and Biodegradable Polyesters of 2-Pyrone-4,6-Dicarboxylic Acid (PDC), *Polym. J.*, **2009**, *41*, p. 1111-16, https://doi.org/10.1295/polymj.PJ2009045R

[3] C. P. Sharma *et al.*, Synthesis of Solution-Processable Donor–Acceptor Pyranone Dyads for White Organic Light-Emitting Devices, *J. Org. Chem.*, **2019**, *84*, p. 7674-84, https://doi.org/10.1021/acs.joc.9b00293

[4] G. Huang, C. Kouklovsky, A. de la Torre, Inverse-Electron-Demand Diels–Alder Reactions of 2-Pyrones: Bridged Lactones and Beyond, *Chem. Eur. J.*, **2021**, *27*, p. 4760-88, https://doi.org/10.1002/chem.202003980

[5] I. E. Markó, G. R. Evans, J. P. Declercq, Catalytic asymmetric Diels-Alder reactions of 2-pyrone derivatives, *Tetrahedron*, **1994**, *50*, p. 4557-74, https://doi.org/10.1016/S0040-4020(01)89387-X

[6] G. H. Posner, J. C. Carry, J. K. Lee, D. S. Bull, H. Dai, Mild, asymmetric Diels-Alder cycloadditions of electronically matched 2-pyrones and vinyl ethers, *Tetrahedron Lett.*, **1994**, *35*, p. 1321-24, https://doi.org/10.1016/S0040-4039(00)76207-1

[7] X. W. Liang *et al.*, Enantioselective Synthesis of Arene *cis*-Dihydrodiols from 2-Pyrones, *Angew. Chem. Int. Ed.*, **2019**, *58*, p. 14562-67, https://doi.org/10.1002/anie.201908284

[8] X. G. Si, Z. M. Zhang, C. G. Zheng, Z. T. Li, Q. Cai, Enantioselective Synthesis of cis-Decalin Derivatives by the Inverse-Electron-Demand Diels–Alder Reaction of 2-Pyrones, *Angew. Chem. Int. Ed.*, **2020**, *59*, p. 18412-17, https://doi.org /10.1002/anie.202006841

[9] G. Huang, R. Guillot, C. Kouklovsky, B. Maryasin, A. de la Torre, Diastereo- and Enantioselective Inverse-Electron-Demand Diels-Alder Cycloaddition between 2-Pyrones and Acyclic Enol Ethers, *Angew. Chem. Int. Ed.*, **2022**, *61*, e202208185, https://doi.org/10.1002/anie.202208185

[10] K. N. Houk, Y. T. Lin, F. K. Brown, Evidence for the concerted mechanism of the Diels-Alder reaction of butadiene with ethylene, *J. Am. Chem. Soc.*, **1986**, *108*, p. 554-56, https://doi.org/10.1021/ja00263a059

[11] Y.-M. Yan *et al.*, (+/–)-Lucidumone, a COX-2 Inhibitory Caged Fungal Meroterpenoid from Ganoderma lucidum, *Org. Lett.*, **2019**, *21*, p. 8523-27, https://doi.org/10.1021/acs.orglett.9b02840

[12] G. Huang, C. Kouklovsky, A. de la Torre, Gram-Scale Enantioselective Synthesis of (+)-Lucidumone, *J. Am. Chem. Soc.*, **2022**, *144*, p. 17803-07, https://pubs.acs.org/doi/10.1021/jacs.2c08760

Cette fiche a été préparée par **Céline BOUCHEL**, doctorante à l'Institut de Chimie Moléculaire et des Matériaux d'Orsay (ICMMO), et **Aurélien DE LA TORRE**, chargé de recherche CNRS à l'ICMMO (aurelien.de-la-torre@universite-paris-saclay.fr).

Aurélien de la Torre a reçu le Prix Jeune chercheur Jean-Pierre Sauvage 2025 de la division Chimie organique de la SCF.

Les fiches « Un point sur » sont coordonnées par Jean-Pierre FOULON (jpfoulon@wanadoo.fr) et Julien LALANDE (jlalande@nordnet.fr). Elles sont en téléchargement libre sur www.lactualitechimique.org

Complétez votre collection et abonnez-vous

Les sommaires de tous les numéros peuvent être consultés sur notre site (www.lactualitechimique.org)
Tous les articles et numéros de plus de cinq ans sont téléchargeables gratuitement

Abonnez-vous pour un an (numéros spéciaux inclus)

Cochez la case qui correspond à l'abonnement auquel vous voulez souscrire :

Abonnement papier + électronique*			
	France métropolitaine	**DROM-COM / Zone 1****	**Zone 2****
Lycées	☐ 170€	☐ 210€	☐ 225€
Institutions	☐ 340€	☐ 380€	☐ 395€

*Courriel obligatoire **Zone 1 : Union européenne, Royaume-Uni et Suisse ; Zone 2 : reste du monde

Numéros spéciaux

également disponibles en **version électronique** sur le site à un tarif préférentiel

Dernières parutions :

- ☐ Les 20 ans de l'ISCR (juillet-août 2026) : 32 €
- ☐ Criminalistique & NRBCe (mai-juin 2026) : 20 €
- ☐ Algues (janvier 2025) : 20 €
- ☐ Organocatalyse (septembre 2024) : 20 €
- ☐ Retour sur les JIREC 2024 (juillet-août 2024) : 20 €
- ☐ Bois archéologiques (juin 2024) : 20 €
- ☐ Surveillances de l'eau (mars 2024) : 20 €
- ☐ Sport et dopage (février 2024) : 20 €
- ☐ Des biomarqueurs pour la médecine du futur (décembre 2023) : 20 €
- ☐ Chimie et bois (mai-juin 2023) : 32 €
- ☐ De la vigne aux vins (décembre 2022) : 20 €
- ☐ La diffusion de neutrons (octobre 2022) : 20 €
- ☐ Le fer en catalyse : un élément d'avenir (mai-juin 2022) : 32 €
- ☐ Répondre aux menaces : explosifs, déminage et management de crises (avril 2022) : 20 €
- ☐ La chémobiologie explore le vivant (décembre 2021) : 20 €



Collection « Chimie et… », co-éditée et diffusée par EDP Sciences

Dernières parutions :

- Chimie et alimentation (janvier 2026) : 25 €
- Chimie et eau (septembre 2025) : 25 €
- Chimie et Sport olympique et paralympique (février 2025) : 25 €
- Chimie, recyclage et économie circulaire (janvier 2025) : 25 €
- Chimie et Intelligence Artificielle (sept. 2024) : 25 €
- Chimie et matériaux stratégiques (février 2024) : 25 €
- Chimie et Notre-Dame de Paris (août 2023) : 25 €
- Chimie et agriculture durable (nov. 2022) : 25 €
- Chimie et énergies nouvelles (mars 2022) : 25 €
- Chimie et lumière (janv. 2021) : 25 €
- Chimie et nouvelles thérapies (sept. 2020) : 25 €
- Chimie et Alexandrie dans l'Antiquité (janv. 2020) : 25 €
- Chimie, nanomatériaux, nanotechnologies (sept. 2019) : 25 €



À commander chez votre libraire ou directement sur laboutique.edpsciences.fr



Bon de commande

Nom ..... Prénom .....
Adresse (pour les particuliers, préciser l'adresse personnelle) .....
.....
Code postal ..... Ville ..... Pays .....
Tél. ..... Courriel .....
Adresse IP (pour l'abonnement multiple) .....

Montant total de la commande (frais de port inclus) : ☐ Souhaite recevoir une facture acquitée

Mode de règlement

- ☐ Sur facturation (joindre obligatoirement le bon de commande) par chèque bancaire ou postal libellé à l'ordre de la SCF
- ☐ Par virement bancaire ou postal

France — Société Générale Paris Seine Amont, 03081/00037265820/87 CCP Paris 30041 Compte 070786U020/90
Étranger — IBAN FR7630003030810003726582087 Swift.Sogefrpp

L'Actualité Chimique
SCF, Service Abonnement, 250 rue Saint-Jacques, 75005 Paris - adhesion@societechimiquedefrance.fr


COLLOQUE
4 Novembre 2026
Chimie et
CERVEAU
Fondation de la Maison de la Chimie
Maison de la Chimie
28 bis rue Saint-Dominique 75007 Paris