

N° 512 - MARS 2026

l'actualité chimique

LE JOURNAL DE LA SOCIÉTÉ CHIMIQUE DE FRANCE



**CHIMIE
AU FÉMININ**

**LES BRUMES
DE TITAN**

**CHIMIE VERTE
AU VILLAGE**

CONGRÈS SCF 2026

Les défis de la chimie de demain

BORDEAUX

22 AU 24 JUIN 2026

WEEK-END GRAND PUBLIC

CAP SCIENCE - BORDEAUX - 20 AU 21 JUIN



Pour plus
d'informations
scannez ici !

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
Rédactrice en chef : Patricia Pineau
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. Colombar, B. Delfort,
C. Dupuis, L. Estournet, K. Fajerweg, 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,
N.-J. Moreau, J.-M. Paris, A. Perrot, P. Pichat, P. Rabu,
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 2025 – Tous droits de reproduction réservés
Dépôt légal : mars 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.



Photo : Manon Fontaine pour Le Télégramme.

Chimiste, un métier de femmes

Les mois de février et de mars, marqués par la Journée internationale des femmes et des filles de sciences et la Journée internationale des droits des femmes, constituent des moments privilégiés pour aborder la question de l'égalité entre les femmes et les hommes, et en particulier celle de la place des femmes dans les domaines des STIM (« Sciences, Technologies, Ingénierie et Mathématiques »).

À l'échelle européenne, le rapport *She Figures 2024*⁽¹⁾ met en évidence des progrès dans les secteurs de la recherche et de l'innovation, mais ceux-ci sont encore insuffisants. Ainsi, si les femmes représentent 41 % de la population active, elles ne sont que 37 % des chercheur·es, alors qu'elles occupent 47 % des fonctions support, souvent les moins qualifiées. Si des améliorations sont observées, des barrières structurelles persistent. Ce constat vaut pour de nombreux pays, dont la France.

La sous-représentation féminine dans les STIM s'explique par un ensemble de facteurs bien identifiés. Les biais de genre et le poids des stéréotypes interviennent dès le plus jeune âge et influencent l'orientation scolaire, mais ils ne suffisent pas à expliquer les écarts observés. S'y ajoutent un moindre sentiment de légitimité, des mécanismes d'évaluation parfois biaisés, ainsi que des normes professionnelles et des organisations de carrière encore peu compatibles avec les contraintes familiales. Ces facteurs, qui se renforcent mutuellement, freinent durablement les trajectoires féminines vers les études et les

carrières scientifiques. Cette situation apparaît d'autant plus paradoxale que les filles réussissent globalement mieux dans leurs études et sont aujourd'hui plus diplômées que les garçons. Les récents rapports *Filles et mathématiques : lutter contre les stéréotypes, ouvrir le champ des possibles*⁽²⁾ de l'Inspection générale de l'éducation, du sport et de la recherche et de l'Inspection générale des finances, et *XX=XY, féminiser les sciences, dynamiser la société*⁽³⁾ de la délégation au droit des femmes du Sénat, ont largement documenté ces phénomènes. Ainsi, en France, les femmes représentent bien plus de 50 % de la population étudiante au niveau bac + 5, mais seulement 33 % dans les filières STIM ; la chimie constitue toutefois une exception avec un taux de 58 % de femmes diplômées en 2023.

On pourrait dès lors supposer que l'égalité entre les femmes et les hommes est globalement atteinte, dans le domaine de la chimie. Qu'en est-il réellement ?

Dans le monde académique, les femmes sont effectivement bien présentes dans cette discipline, formant environ 38 % des effectifs en 2023, une proportion stable depuis 2019. Si l'on considère l'ensemble des enseignant·es-chercheur·es, elles atteignent 39 % des effectifs, mais seulement 31 % des professeurs des universités, ce qui témoigne d'un accès encore limité aux positions les plus élevées. Une analyse similaire menée par l'Institut de chimie du CNRS met en évidence de fortes disparités selon les sections disciplinaires ; la section « Architectures moléculaires : synthèses, mécanismes



et propriétés » ne compte que 25,1 % de chercheuses en 2024.

Dans l'industrie, la chimie demeure l'un des secteurs industriels les plus féminisés, en particulier dans les industries chimiques et pharmaceutiques. En 2021, les femmes représentaient 44 % des ingénieurs chimistes, contre 24 % en moyenne dans l'ensemble des secteurs d'activité. Néanmoins, certains métiers restent peu accessibles aux femmes, notamment dans la maintenance et la production.

Que ce soit dans le milieu académique ou en entreprise, des inégalités persistent : les femmes occupent davantage de fonctions administratives que techniques et accèdent plus difficilement aux postes de direction. Comme de nombreux domaines, la chimie n'échappe ni au phénomène de « tuyaux percés », caractérisé par une diminution progressive de la proportion de femmes à mesure que l'on s'élève dans la hiérarchie, ni au « plafond de verre », qui restreint l'accès aux fonctions les plus élevées et les mieux rémunérées. Elles demeurent également moins visibles : elles obtiennent moins de distinctions, leurs travaux de recherche sont moins cités que ceux de leurs homologues masculins et elles sont plus rarement invitées à donner des conférences lors de colloques et congrès.

Pourtant, les femmes ont toujours contribué de manière essentielle au développement des savoirs et des technologies. Longtemps invisibilisées, leurs mérites souvent minimisés, elles ont été victimes de ce que l'on nomme l'« effet Matilda ». La question « Sciences : où sont les femmes ? », reprise par l'Académie des sciences en juin 2024⁽⁴⁾, illustre la persistance de ce biais structurel dans la reconnaissance scientifique.

Les femmes représentent la moitié de l'humanité : elles ne peuvent être absentes et doivent pouvoir apporter pleinement leur contribution dans un environnement qui les accueille vraiment. À un moment où les jeunes filles se détournent de plus en plus des sciences, il est donc essentiel d'en parler dès le plus jeune âge, à l'école comme en dehors, aux filles comme aux garçons, pour construire le monde de demain. Dans cette dynamique, de nombreuses associations se mobilisent et mènent un travail de fond, indispensable mais encore insuffisant pour inverser durablement les tendances.

Créée il y a vingt-cinq ans, l'association Femmes & Sciences (F&S)⁽⁵⁾ poursuit un double objectif : promouvoir les sciences et les techniques auprès des jeunes et valoriser la place des femmes dans ces domaines. Il est nécessaire de poursuivre et d'amplifier ces actions, notamment en mettant à l'honneur des modèles féminins scientifiques et en les rendant visibles. Parmi les initiatives marquantes figurent les expositions

Science taille XX elles⁽⁶⁾, issues d'une collaboration entre F&S et le CNRS. Leur succès a conduit à la publication, en octobre 2025, de l'ouvrage *Les filles sont parfaites pour les sciences – La preuve en 48 portraits de femmes* (MkF éditions), qui répond manifestement à un besoin de figures inspirantes et contribue à montrer aux plus jeunes que les sciences leur sont pleinement accessibles.

En ce début 2026, F&S se réjouit de l'aboutissement du projet d'inscrire durablement les noms de 72 femmes scientifiques sur la tour Eiffel – projet d'envergure, fondé sur une idée de Benjamin Rigaud et des étudiant·es de *Défi Sorbonne*, qu'elle a porté avec détermination pendant plus de quatre ans⁽⁷⁾.

Au sein de la Société Chimique de France (SCF), des actions ont aussi été engagées. Dès 2020, devant le constat que le nombre de prix attribués à des femmes était nettement inférieur à ceux attribués à des hommes, des mesures ont été mises en place afin d'encourager la proposition de candidatures féminines et de renforcer leur visibilité. Depuis, le groupe thématique Égalité, qui réunit des femmes et des hommes engagés sur les questions d'égalité, a été institutionnalisé et est maintenant doté d'un bureau à l'instar des autres entités de la SCF⁽⁸⁾. Les premières actions en faveur de l'égalité sont encourageantes.

Dans ce numéro de *L'Actualité Chimique*, les femmes chimistes sont mises à l'honneur. Sont d'abord évoquées celles du passé, qui ont évolué dans des contextes parfois difficiles, voire hostiles, et dont les parcours témoignent d'un engagement remarquable, tant dans le développement des connaissances scientifiques que dans leur implication sociétale. Certaines d'entre elles trouveront bientôt leur place sur la tour Eiffel parmi les 72 femmes de sciences, d'autres femmes, tout aussi méritantes, auraient également pu y figurer.

Les modèles contemporains sont tout aussi essentiels, à l'image de ces jeunes femmes talentueuses et inspirantes, lauréates des Prix Jeunes Talents France L'Oréal-UNESCO *Pour les Femmes et la Science*. Ces jeunes chimistes seront sans doute une source d'inspiration pour les nouvelles générations. Leurs témoignages montreront aux plus jeunes que les sciences leur sont pleinement accessibles et qu'elles constituent un véritable champ d'engagement et d'accomplissement professionnel.

Des progrès ont été réalisés, mais beaucoup reste à faire pour atteindre l'objectif de la parité. Faut-il pour autant cesser de communiquer ? Bien au contraire : c'est à travers les témoignages et les portraits de femmes scientifiques passionnées, engagées et inspirantes que les plus jeunes pourront se dire : « Oui les sciences, c'est aussi possible pour moi ! ».

Françoise Conan*,

Présidente de Femmes & Sciences,
Professeure des Universités
à l'Université de Bretagne Occidentale (UBO),
Laboratoire de chimie électrochimie moléculaires
et chimie analytique (UMR 6521)

* francoise.conan@univ-brest.fr

(1) European Commission: Directorate-General for Research and Innovation, *She Figures 2024 – Gender in research and innovation – Statistics and indicators*, Publications Office of the European Union, 2025, <https://data.europa.eu/doi/10.2777/592260>

(2) www.education.gouv.fr/inspection-generale-de-l-education-du-sport-et-de-la-recherche/filles-et-mathematiques-lutter-contre-les-stereotypes-ouvrir-le-champ-des-possibles-465606

(3) www.senat.fr/rap/r25-009-1/r25-009-1.html

(4) www.academie-sciences.fr/sciences-ou-sont-les-femmes-rapport

(5) www.femmesetsciences.fr

(6) www.femmesetsciences.fr/la-science-taille-xx-elles-france

(7) www.femmesetsciences.fr/femmes-scientifiques-tour-eiffel

(8) Voir les actualités de la SCF dans le numéro de janvier 2026, p.60, et <https://new.societechimiquedefrance.fr/groupes/groupe-egalite/presentation-du-groupe-egalite>

ÉDITORIAL

Chimiste, un métier de femmes, par **F. Conan**

CLIN D'ŒIL ÉTYMOLOGIQUE

À propos de la quinoléine, par **P. Avenas**

LE GRAIN DE SEL DU RJ-SCF

Sorcières, sciences et silences, par **L. Estournet** et **A. Perrot**

CHIMIE VERTE INSIGHTS – REGARDS SUR LA CHIMIE VERTE

La chimie verte à l'honneur au Village de la Chimie 2026 : paroles croisées sur les nouveaux défis et métiers

CHIMIE AU FÉMININ. PARCOURS, VOIX ET ENGAGEMENTS DE FEMMES SCIENTIFIQUES

Coordinatrices : Valérie Marvaud et Séverine Bléneau-Serdel

Chimie au féminin, par **V. Marvaud** et **S. Bléneau-Serdel**

Ressenti et discriminations de genre : ce qui freine la féminisation des filières scientifiques, par **C. Jacquemot**

72 femmes de sciences pour la tour Eiffel. Parcours de chimistes..., par **X. Bataille**

Une femme de science à part : Marie-Anne Paulze (1758-1836), épouse Lavoisier (1771-1794), par **E. Jacques**

Aline Auroux, une chimiste engagée dans l'innovation et la transmission du savoir

La piste moléculaire pour le stockage et la conversion d'énergie solaire, par **L. Chocron**

Spins ordonnés vs Température: La bataille des aimants moléculaires, par **R. Diego Creixenti**

Chimie des substances naturelles et engagement scientifique : innover, transmettre, inspirer, par **Y. Duchaudé**

L'innovation chimique redonne une seconde vie aux textiles, par **M. Négrier**

Le polystyrène à l'épreuve des enzymes : vers un surcyclage durable, par **M. Pujol**

Du défaut à la fonction : capteurs 2D sélectifs par fonctionnalisation. Des défauts réactifs pour une haute sensibilité et une sélectivité programmée par reconnaissance supramoléculaire, par **A. Zhuravlova**

Hommage à Andrée Marquet, par **D. Guianvarc'h**, **P. Karoyan**, **L. Valade** et **M.-C. Vitorge**

RECHERCHE ET DÉVELOPPEMENT

Reflets de la physique

Les brumes de Titan : des grains organiques formés dans la haute atmosphère ionisée, par **A. Chatain**

EN BREF

LIVRES ET MÉDIAS

AGENDA

ACTUALITÉS DE LA SCF

UN POINT SUR

Fiche n° 133 : Les carbènes (alkyles)(amino) cycliques énantiomériquement purs : une architecture 3D chirale innovante pour la catalyse asymétrique, par **F. Morvan**, **M. Liu**, **N. Vanthuyne**, **R. Jazzar** et **M. Mauduit**



Couverture :

Illustration Canva, conception Olivia Pradel, SCF.



« La science
est mon terrain de jeu »

Agnès Borbon
Chimiste de l'atmosphère

LA SCIENCE
TAILLE
XX
ELLES



À propos de la quinoléine



Le chimiste français Charles Gerhardt est né en 1816 à Strasbourg. Son père, qui a repris une usine de céruse (blanc de plomb), l'a envoyé se former en chimie à Karlsruhe, puis à Leipzig, et finalement dans le laboratoire du professeur Liebig à Giessen en 1836 et 1837. Il revient alors en France et passe sa thèse à Paris sous la direction de Jean-Baptiste Dumas, qui facilite sa nomination à l'université de Montpellier, où il exerce de 1841 à 1848. Après un

nouveau passage par Paris, il est nommé en 1855 professeur de chimie à Strasbourg, où il décède l'année suivante d'une fièvre soudaine à deux jours de ses 40 ans.

En dehors de ses travaux théoriques sur la classification des substances en chimie organique, Gerhardt est célèbre pour avoir le premier synthétisé en 1853 l'acide acétylsalicylique, précurseur de l'aspirine. Auparavant, il a obtenu en 1842 la quinoléine, qui fait l'objet du présent article.

De la quinine à la quinoléine

Dans les *Annalen der Chemie und Pharmacie* début 1842, Gerhardt publie en allemand ses « investigations sur les bases organiques » où il écrit : « La quinine est transformée, sous l'action de la potasse, en une nouvelle substance azotée, une base de consistance huileuse à température ordinaire. » Il nomme cette substance en allemand *Chinoilin*, de *Chinin*, « quinine », et *-oil-*, « huile ». Plus tard dans la même année 1842 et dans les mêmes annales, il publie un deuxième article sur ce sujet, avec un titre étrange, « *Chinolein oder Chinoilin* », où il retient finalement le nom *Chinolein*.

Puis en 1843, Gerhardt publie, en français cette fois dans les *Annales de chimie et de physique*, un article sur la suite de ces travaux, où « il donne le nom de quinoléine » à la nouvelle substance. Ce nom est resté en usage en français jusqu'à nos jours, comme en espagnol, *quinoleina*, mais en allemand, au lieu des deux noms proposés par Gerhardt, l'usage en a retenu un troisième, *Chinolin*, sur lequel sont alignés l'anglais *quinoline* (attesté en 1845) et l'italien *chinolina*.

La quinine et d'autres alcaloïdes



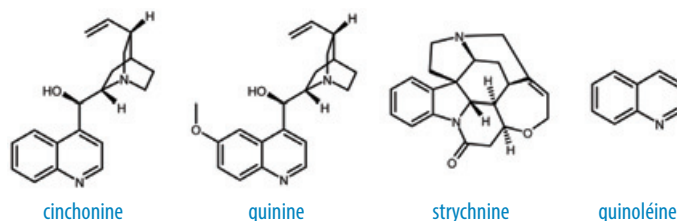
La noix vomique, source de strychnine, est la graine du vomiquier. Lalithamba/Flickr – CC-BY-SA-2.0.

Dans son deuxième article de 1842, Gerhardt montrait qu'en traitant la cinchonine et la strychnine par la potasse, on obtenait la même substance qu'avec la quinine. Ces trois alcaloïdes étaient connus alors grâce aux travaux des chimistes Pelletier et Caventou qui ont découvert en 1818 la quinine, extraite de l'écorce

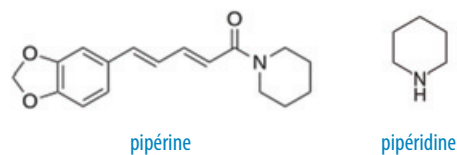
du quinquina, comme l'avait été la cinchonine auparavant⁽¹⁾. Quant à la strychnine, qui est un poison violent, elle a été extraite d'une graine nommée *noix vomique* (en latin *nux vomica*, de *vomere*, « vomir ») car elle a des propriétés vomitives. C'est la graine d'un arbre d'Asie du Sud-Est, le vomiquier, nommé *Strychnos nux-vomica* en 1753 par Linné. Celui-ci s'est inspiré du grec *strukhnos* employé par Théophraste et Dioscoride, latinisé en *strychnos* par Pline l'Ancien, pour désigner plusieurs espèces végétales toxiques pour la plupart.

Dans son article de 1843, Gerhardt précise, dans un style quelque peu anthropomorphique : « De ces trois bases organiques [= alcaloïdes], celle qui se prête le mieux à la formation de la quinoléine est la cinchonine. La strychnine réussit moins bien que les deux autres. »

Les structures des trois alcaloïdes et de la quinoléine ont été établies par la suite.



Après avoir observé ces structures, on ne s'étonne pas de voir que la formation de quinoléine est la plus facile à partir de la cinchonine, un peu moins facile à partir de la quinine, et nettement plus difficile à partir de la strychnine. Le nom *quinoléine* traduit bien en tout cas le fait que cette molécule est une partie de la molécule de quinine. Cela rappelle le cas analogue de la pipéridine, dont le nom vient du latin *piper*, « poivre », car cette molécule est une partie de la molécule de pipérine, le principe actif du poivre.



Épilogue

L'histoire de la quinoléine remonte en fait à 1834, lorsque le chimiste allemand Runge a obtenu par distillation du goudron de houille une nouvelle substance huileuse, qu'il a nommée *Leukol* ou *Weifsöl*, *leukos* en grec ou *weiss* en allemand signifiant ici « incolore », car les autres produits de cette distillation étaient colorés. Après une période d'incertitude, il est apparu que les substances nommées *quinoléine* par Gerhardt et *Leukol* par Runge, qui n'étaient pas tout à fait pures, comportaient le même composant principal dont le nom est resté *quinoléine*.

⁽¹⁾ P. Avenas, M.-T. Dinh-Audouin, *La Prodigieuse histoire du nom des éléments*, EDP Sciences/SCF, 2018, p. 178.

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

*pier.avenas@orange.fr

Sorcières, sciences et silences

Salem, 1692. L'air froid et humide porte une odeur âcre de bois brûlé et de terre battue. Dans la salle du tribunal, les bancs grincent sous le poids des corps qui s'y serrent et les murmures deviennent clameurs alors qu'une femme se dirige au centre de la pièce, face aux juges. Potions et envoûtements sont évoqués. Les juges sont déjà convaincus et le procès joué d'avance. La sentence tombe : sorcière !

Trois siècles plus tard, les procès de Salem sont le symbole d'une peur collective, nourrie par la méconnaissance des phénomènes naturels. Comment l'incompréhension de savoirs et pratiques aujourd'hui rattachés à la chimie ont-ils conduit à l'exclusion et à la stigmatisation de femmes et en quoi ces mécanismes, sous des formes plus diffuses, résonnent-ils encore dans le monde scientifique contemporain ? Remontons le fil.

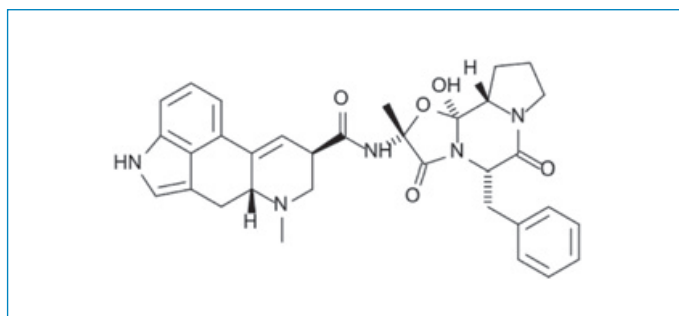
La psychose de Salem

Au début de 1692, à Salem Village, dans la colonie puritaine de la baie du Massachusetts, Betty Parris et Abigail Williams présentent convulsions, cris et sensations de brûlures invisibles. Faute d'explication médicale consensuelle, ces troubles sont interprétés à l'aune des croyances locales, et les soupçons se portent rapidement sur des femmes perçues comme marginales ou détentrices de savoirs jugés inquiétants, notamment liés aux pratiques domestiques et à l'usage des plantes [1]. Les premières accusées sont Tituba, esclave du foyer Parris, Sarah Good et Sarah Osborne, socialement vulnérables [2].

Au printemps, des tribunaux spéciaux admettent les « preuves spectrales », élargissant les poursuites [3]. Plus de 200 personnes sont accusées, vingt exécutées, dont quatorze femmes ; Giles Corey meurt sous la torture [1]. Sous fond de rivalités économiques et religieuses structurées, opposant familles et intérêts locaux [2], la sorcellerie devient ainsi un langage par lequel une communauté projette ses peurs et désigne comme coupable un groupe majoritairement féminin, fréquemment associé à des savoirs empiriques sur les plantes, les remèdes ou les substances naturelles, interprétés comme suspects faute d'être reconnus comme des connaissances légitimes.

L'hypothèse de l'ergot de seigle

À quelques kilomètres du tribunal de Salem, les terres humides de Nouvelle-Angleterre étaient cultivées en seigle, base de l'alimentation locale. Ces conditions favorisent la prolifération de *Claviceps purpurea*, champignon parasite qui remplace le grain par une masse sombre riche en



Structure chimique de l'ergotamine.

alcaloïdes toxiques, dont l'ergotamine (voir figure). Leur ingestion peut provoquer l'ergotisme, ou « mal des ardents », sous forme gangréneuse ou convulsive, cette dernière associée à des spasmes, troubles du comportement et hallucinations [4].

En 1976, Linnda R. Caporael a proposé que certains symptômes observés à Salem – convulsions, cris, sensations de brûlure – puissent correspondre à un ergotisme consécutif à la consommation de seigle contaminé [5]. L'hypothèse, appuyée sur des conditions climatiques favorables, a cependant été contestée, notamment en raison de l'absence de gangrènes documentées et de la dynamique sociale des accusations [6]. Elle ne fait pas consensus, mais montre comment un phénomène biochimique peut être interprété comme surnaturel dans un contexte de tension.

De la diabolisation à l'invisibilisation : l'effet Matilda

Trois siècles après Salem, la figure de la sorcière est parfois réinvestie dans les mouvements féministes contemporains comme symbole de résistance face aux tentatives historiques de disqualification des savoirs féminins. Sans assimiler la chimiste d'aujourd'hui à la sorcière d'hier, cette réappropriation rappelle la nécessité de défendre la légitimité des femmes à produire et transmettre du savoir. En 1993, l'historienne des sciences Margaret W. Rossiter propose l'expression « effet Matilda », en référence à la militante féministe Matilda Joselyn Gage, pour désigner la tendance récurrente à minimiser, ignorer ou attribuer à des collègues masculins les contributions scientifiques des femmes [7]. Ce phénomène prolonge l'« effet Matthieu » décrit par Robert K. Merton [8]. Appliqué au genre, il met en évidence un mécanisme de disqualification plus discret que la persécution, mais structurant : les travaux existent, tandis que leurs autrices disparaissent progressivement du récit scientifique.



Portrait de Matilda Joselyn Gage (1826-1898), 1876 (Schlesinger Library on the History of Women in America).

L'invisibilisation ne relève plus de la chasse aux sorcières, mais de mécanismes plus diffus : moindre accès aux réseaux d'influence, sous-représentation dans les conférences plénières, déséquilibres persistants dans les instances décisionnelles. Les données contemporaines montrent que ces dynamiques ne relèvent pas seulement du passé. En France, les femmes représentent environ 55 % des étudiants à l'université, mais leur proportion diminue dans les filières scientifiques les plus sélectives et aux niveaux les plus élevés de carrière. Elles constituent près de 48 % des doctorants toutes disciplines confondues, mais environ 30 % seulement des professeurs des universités [9].

Elles s'appellent Lise Meitner, Jocelyn Bell Burnell, Emmanuelle Charpentier, Françoise Combes, Margaret Hamilton, Maud Menten.

Elles ont découvert l'effet Meitner-Auger et contribué à la compréhension de la fission nucléaire, découvert les pulsars, mis au point un outil révolutionnaire d'édition du génome, renouvelé l'étude de la dynamique des galaxies, conçu le logiciel embarqué qui permit l'alunissage d'Apollo 11, et formulé un modèle fondamental de la cinétique enzymatique. Leurs noms ne figurent pas parmi les soixante-douze proposés pour être prochainement gravés sur la tour Eiffel. Pourtant, ils appartiennent pleinement à l'histoire des sciences. Il nous

revient de reconnaître leurs travaux, les citer, les enseigner et les inscrire dans le récit collectif des sciences. Ce n'est pas réécrire l'histoire : c'est la compléter.

- [1] E.W. Baker, *A Storm of Witchcraft: The Salem Trials and the American Experience*, Oxford University Press, 2015.
- [2] P. Boyer, S. Nissenbaum, *Salem Possessed: The Social Origins of Witchcraft*, Harvard University Press, 1974.
- [3] B.P. Levack, *The Witch-Hunt in Early Modern Europe*, Longman, 1987.
- [4] P.W. van Dongen, A.N. de Groot, History of ergot alkaloids from ergotism to ergometrine, *Eur. J. Obstet. Gynecol. Reprod. Biol.*, 1995, 60(2), p. 109-16, [https://doi.org/10.1016/0028-2243\(95\)02104-z](https://doi.org/10.1016/0028-2243(95)02104-z)
- [5] L.R. Caporael, Ergotism: the Satan loosed in Salem?, *Science*, 1976, 192, p. 21-6, <https://doi.org/10.1126/science.769159>
- [6] N.P. Spanos, J. Gottlieb, Ergotism and the Salem Village witch trials, *Science*, 1976, 194, p. 1390-4, <https://doi.org/10.1126/science.795029>
- [7] M.W. Rossiter, The Matthew Matilda effect in science, *Soc. Stud. Sci.*, 1993, 23(2), p. 325-41, <https://doi.org/10.1177/030631293023002004>
- [8] R.K. Merton, The Matthew effect in science: the reward and communication systems of science are considered, *Science*, 1968, 159, p. 56-63, <https://doi.org/10.1126/science.159.3810.56>
- [9] Ministère de l'Enseignement supérieur et de la Recherche, *L'état de l'enseignement supérieur, de la recherche et de l'innovation en France*, édition 2023, www.enseignementsup-recherche.gouv.fr/fr/l-etat-de-l-enseignement-superieur-de-la-recherche-et-de-l-innovation-en-france-2023-90566

Le Young French Chemical Biologists (YFCB)



Le bureau du YFCB, de gauche à droite : Marc Panosetti, Marie Auvray, Lina El Hajji, Francisca Figueiredo, Lisa Gourdon-Grünewaldt, Manon Sturbaut.

Le *Young French Chemical Biologists*, groupe rattaché à la division Chémobiologie de la Société Chimique de France, a été récemment lancé pour rassembler les jeunes chercheuses et chercheurs en chémobiologie travaillant en France ou souhaitant y développer leur carrière. Né du besoin d'un espace dédié aux scientifiques en début de parcours, YFCB favorise les échanges, la visibilité et les collaborations au sein de la communauté française. Son bureau, composé de six jeunes scientifiques aux expertises complémentaires exerçant en France et en Europe, organise déjà des webinaires donnant la parole aux étudiants en master, aux doctorants et aux postdocs. Des tables rondes consacrées aux parcours professionnels viendront prochainement enrichir ces initiatives. À terme, YFCB mettra en place un programme de mentorat et des événements en présentiel pour les jeunes chémobiologistes.

• Pour plus d'informations, n'hésitez pas à contacter le bureau : yfcb@societechimiquedefrance.org

Le Global Women's Breakfast du RJ-SCF Normandie

Affiche du webinaire organisé par le RJ-SCF Normandie à l'occasion du GWB.

Le 10 février 2026, dans le cadre du *Global Women's Breakfast* (GWB) – initiative annuelle de l'IUPAC pour promouvoir l'égalité femmes-hommes en science –, le RJ-SCF Normandie a organisé un webinaire mettant à l'honneur deux jeunes chercheuses de la région : Hélène Beucher (Institut CARMEN, Rouen) et Floriane Rischard (URCOM, Le Havre). Les intervenantes ont présenté leurs parcours et leurs travaux de recherche, suivis d'un temps d'échange avec le public sur les enjeux de la place des femmes en chimie. Une quinzaine de doctorant(e)s, postdoctorant(e)s et jeunes permanent(e)s ont participé à cette rencontre, dans un format informel et interactif.

• Pour plus d'informations sur le GWB ou si vous souhaitez organiser un événement similaire pour la prochaine édition : <https://iupac.org/gwb>

Lise ESTOURNET¹, membre du Bureau national du RJ-SCF, responsable communication, est doctorante à l'Institut des Sciences Moléculaires d'Orsay.

Alexis PERROT², président du RJ-SCF Normandie, est chercheur postdoctoral à l'Institut CARMEN, Caen.

¹lise.estournet@gmail.com

²alexis.perrot@ensicaen.fr

La chimie verte à l'honneur au Village de la Chimie 2026

Paroles croisées sur les nouveaux défis et métiers

Deux jours au Village de la Chimie 2026, et une même impression qui revient : la chimie se raconte mieux quand on la fait entendre. Sur le thème « *Chimie verte : nouveaux défis, nouveaux métiers !* », nous avons pu récolter des paroles « sur le vif », côté stands et côté visiteurs. Entre attractivité des métiers, innovations plus sobres et envie de transmission, ces témoignages croisés montrent comment la chimie verte devient, pour beaucoup, une boussole... et un moteur de vocations.

Sébastien MARTIN, ministre délégué chargé de l'Industrie



« Je suis vraiment très heureux d'être avec vous aujourd'hui pour fêter la 23^e édition du Village de la Chimie. C'est le signe d'un intérêt et d'une curiosité pour ce qu'est notre industrie, pour ce qu'est la chimie aujourd'hui en France : on la voit souvent comme une science, mais c'est aussi une industrie fondamentale. [...] Pas d'aéronautique sans matériaux composites, pas de

voitures électriques sans batteries, pas de bâtiments durables sans nouveaux isolants. Et par sa capacité à inventer de nouvelles solutions, la chimie est au cœur d'une économie plus compétitive, plus innovante et plus durable. [...] On est très loin de l'image d'Épinal : oui, il y a une histoire, mais il faut regarder comment cette histoire participe à construire l'avenir, un avenir respectueux de l'environnement, et sans la chimie, il n'y a pas les solutions. La filière chimique est une filière d'avenir, et pour que cet avenir soit concret, la chimie a besoin de vous : les jeunes, les salariés en reconversion, les enseignants passionnés, les professionnels qui veulent transmettre. Le secteur s'engage pour vous : n'hésitez pas, foncez ! » (extrait de son discours d'inauguration).

Jean-Luc FUGIT, député du Rhône et président du Conseil supérieur de l'énergie



« Je suis là parce que, de formation, je suis à la fois docteur et ingénieur en chimie et je suis heureux de retrouver ce Village. Je le dis souvent : la chimie est encore trop mal comprise, y compris dans ce que l'on peut faire à l'Assemblée nationale, où nous sommes très peu nombreux à être chimistes. [...] La chimie, c'est l'industrie derrière toutes les autres : on ne

construit pas une voiture sans matériaux, pas de production sans procédés, et dans l'énergie, on a besoin de chimie partout. Et quand on parle de chimie verte, on parle d'une chimie qui porte la promesse d'aller vers un respect de plus en plus important de l'environnement. [...] Grâce à des procédés plus sobres, à de nouveaux matériaux, à ce qu'elle permet pour l'énergie, cette chimie verte peut créer de plus en plus d'activités et d'emplois sur notre sol et contribuer à moins dépendre des autres pays. Transition écologique et développement économique sont liés.

Le Village de la Chimie en chiffres

► Visiteurs :

- 13 000 en présentiel
- 22 000 en virtuel

► Exposants :

- 70 entreprises
- 30 écoles et universités
- 35 partenaires

► Contenu :

- 18 conférences et ateliers*
- 30 animations

► Communication sur les réseaux :

- 1 700 000 personnes touchées via TikTok et Instagram

*Toutes les conférences sont en accès libre sur la chaîne YouTube du Village : www.youtube.com/@levillagedelachimie7118/videos

Et surtout, je veux le dire aux jeunes : vous avez deux manières de voir les choses, subir ou choisir. En venant au Village de la Chimie, vous allez rencontrer des acteurs qui vont vous aider à trouver des possibilités de choisir votre avenir » (extrait de son discours d'inauguration).

Olivia PRADEL, Société Chimique de France



« Nous sommes partenaire de France Chimie depuis de nombreuses années ; c'est important pour nous de faire connaître notre association auprès d'un public plus jeune, et de les inciter à rejoindre la Société Chimique de France pour dynamiser le monde de la chimie. Nous sommes ravis car nous avons rencontré énormément de jeunes, beaucoup étaient intéressés par la

Société Chimique de France. On a eu beaucoup de questions et beaucoup de jeunes aussi souhaitent s'investir dans la rédaction de L'Actualité Chimique. »

Clément DUPUIS, CNRS Chimie

« Le CNRS participe au salon depuis une quinzaine d'années, avec deux objectifs. D'une part, expliquer ce qu'est le CNRS, comment ça fonctionne et les modalités pour y entrer. Et depuis plusieurs années, on anime aussi un espace qui a vocation à montrer la recherche au quotidien, de manière plus amusante, et à présenter des parcours très différents : administratif, laboratoire, ingénieurs, chercheurs, techniciens, doctorants. Ça permet aux



étudiants et aux jeunes d'avoir une vision plus incarnée de ce que sont les métiers. Côté visiteurs, le nom « CNRS » est connu, mais ce qu'il y a derrière l'est moins : on explique les disciplines possibles, y compris en chimie, et puis revient toujours la question des stages, des alternances – c'est normal, c'est le but du jeu sur ce genre de salon. Ensuite, on les oriente aussi vers l'espace animation. »

Billy DA COSTA, France Travail Ile-de-France

« La chimie constitue une filière stratégique pour l'Ile-de-France et pour la réindustrialisation durable de notre pays. Dans un contexte où la filière va recruter massivement dans les prochaines années, notre objectif est clair : transformer l'attractivité en recrutements concrets. Notre stand a permis d'agir à trois niveaux : 1) rendre les métiers accessibles et concrets, notamment grâce à des dispositifs immersifs comme la réalité virtuelle, pour permettre aux jeunes et aux personnes en reconversion de se projeter ; 2) proposer des solutions immédiates (offres d'emploi, accompagnement personnalisé, ateliers « 5 minutes pour convaincre », aide à la construction d'un CV) ; et 3) mobiliser nos outils pour sécuriser les parcours et les recrutements (immersions professionnelles, Préparation Opérationnelle à l'Emploi (POEI), « Mon emploi en Ile-de-France », France Travail Pro). Notre présence au Village de la Chimie illustre notre rôle : faire le lien entre une filière qui recrute durablement et des talents qui ont besoin de perspectives concrètes. La chimie est un socle industriel : notre responsabilité collective est d'en faire un levier d'emploi et de compétences pour les Franciliens. »

Diane DE VIGNON, Arkema France



« Aujourd'hui, on est au Village de la Chimie pour montrer qu'Arkema est un acteur engagé de matériaux de spécialité, qui sont durables et performants – un acteur incontournable de la chimie. Nous sommes là pour attirer les jeunes talents, leur montrer les métiers qu'on propose, les possibilités qu'il existe et l'ensemble des parcours qu'ils peuvent faire au sein du groupe. »

Victoire AUBRUN, Syensqo

« Syensqo est fidèle au Village de la Chimie : on vient pour présenter notre jeune entreprise, et tout ce qu'on fait en recherche et innovation sur des marchés porteurs. On est là aussi



pour présenter nos offres d'emplois, et puis pour échanger avec les étudiants, les candidats, les écoles et partager notre passion de la chimie. [...]

Et oui, Syensqo s'ancre dans une démarche de développement durable, notamment avec l'un de nos produits phares présenté sur notre stand : l'idée, c'est aussi de venir échanger sur ce que Syensqo fait pour le développement durable. »

Thomas VERHAEGHE, Michelin



« On participe à ce type d'événement parce qu'on recherche souvent des profils pour l'alternance, des profils pour des stages et aussi quelques profils diplômés. On balaye pas mal de formations : sur ce Village, on a beaucoup d'écoles qui viennent de tous horizons et ça nous intéresse. On est axé aussi sur la diversité, donc la diversité de profils qu'on a au

Village de la Chimie nous intéresse également. [...] On a vu des changements par rapport à l'année dernière : on a eu pas mal de profils, même des expérimentés qu'on n'avait pas eus l'an dernier. On recrute aussi en CDI, et là on a eu des personnes vraiment intéressantes sur la partie CDI. [...] Il ne faut pas se mentir : en France, c'est compliqué de recruter des techniciens. Le Village de la Chimie, c'est un peu notre focus chez Michelin : on vient ici pour recruter, que ce soit en CDI, en apprentissage ou en stage, des futurs techniciens. Le but, c'est de dire que le métier de technicien est très important dans le monde industriel : il ne faut surtout pas hésiter, s'ils ont l'âme d'être techniciens, à rentrer dans le monde du travail – et ils pourront faire une très belle carrière. »

Aglantine PARJADIS DE LARIVIERE, FIPEC



« La FIPEC est une fédération professionnelle qui représente 150 entreprises en France : des fabricants de chimie de formulation (peinture, colle, encre, résine, couleurs pour artistes). Ces fabricants recrutent régulièrement, mais ils sont méconnus et ne bénéficient pas d'une grande attractivité auprès des jeunes.



Recrutements et formations : le mur des opportunités

Au cœur du Village de la Chimie, plus de 2 000 offres d'emplois et de formations étaient proposées par les exposants, avec des opportunités allant du stage et de l'alternance jusqu'au CDI et des parcours de formation du post-bac au bac+5. Ce « mur d'opportunités » illustre concrètement le fil rouge « nouveaux défis, nouveaux métiers » : une chimie qui recrute sur des compétences variées, du terrain aux fonctions plus spécialisées.

Beaucoup de jeunes sont séduits par la chimie, même la chimie de formulation, mais préfèrent d'autres secteurs pourtant très proches – je pense notamment à la cosmétique. Il faut savoir que les fabricants de peinture et de colle proposent exactement les mêmes types de postes, seulement les jeunes ne les connaissent pas. Donc pour moi, c'est essentiel d'être présent sur ce type de salon : pour leur dire que nous existons, que nous recrutons, que nous embauchons, que nous sommes présents partout en France. On a besoin d'eux pour l'industrie de demain, de leur cerveau et de leur engagement, pour réaliser des produits qui seront encore plus respectueux de l'environnement. [...] Il y a déjà énormément de choses qui sont faites : en trente ans, c'est incroyable ! Mais on a encore besoin d'eux pour trouver d'autres solutions, créer des produits avec des fonctionnalités utiles, qui préservent l'environnement et qui font attention aussi à notre santé. »

Dalel RACLOT, Revolab



« Le thème principal étant la chimie verte, notre activité s'inscrit complètement dans le scope du Village de la Chimie. Revolab est une jeune société, créée en octobre 2025, qui met en avant des techniques et des solutions instrumentales innovantes orientées chimie verte, en chimie analytique. Avec

notre expertise en chromatographie gazeuse et spectrométrie de masse, on a choisi de s'orienter vers des solutions d'introduction et de préparation d'échantillons qui n'utilisent aucun solvant organique : ça permet d'éviter l'exposition des analystes et des ingénieurs aux substances dangereuses et aux produits toxiques. Sur le Village, c'est très intense – et très intéressant – parce qu'il y a beaucoup d'écoles et d'étudiants. Je leur fais découvrir ces métiers de la chimie analytique et de la chimie instrumentale : beaucoup ne savent pas que la chimie, ce n'est pas seulement les paillasses, les tubes à essai et les réactifs.

Et puis c'est aussi l'occasion de rencontrer des gens qui font de la chimie verte, du recyclage, de la valorisation de déchets : pouvoir réunir tout ça dans un seul et même endroit, c'est super ! »

Bénédicte LEPOITTEVIN, ENSICAen



« On délivre un diplôme d'ingénieur : on recrute à bac+3 après des classes préparatoires, principalement. On vient sur ce type d'événement pour renforcer notre attractivité, se faire connaître, et associer vraiment l'ENSICAen à la formation en chimie, identifier l'école comme une formation axée sur la chimie et les matériaux. On est là aussi pour l'aspect entre-

prise : développer les partenariats, aider nos élèves à trouver des stages et développer des projets industriels avec les entreprises. [...] Les questions qu'on nous pose le plus ? Les voies d'entrée, d'abord. Ensuite, les parcours, le descriptif du cursus et les différentes options. Et on a un public assez diversifié, entre des lycéens et des étudiants déjà en bac+2, voire bac+3. »

Brigitte ROUSSEAU, Sorbonne Université

« On est là pour présenter toutes les formations qu'on peut avoir à l'Université et répondre aux questions des étudiants, du collège jusqu'à bac+5, sur les opportunités qu'ils peuvent avoir. [...] »



Les questions les plus courantes concernent surtout la licence : « Comment on fait pour entrer à Sorbonne Université ? » On a aussi pas mal de questions sur les licences professionnelles, et ensuite sur le master, cela dépend du niveau des personnes qui viennent sur notre stand. C'est essentielle-

ment des lycéens et des étudiants de BTS qui viennent poser des questions. On a aussi le plaisir de retrouver d'anciens étudiants qui reviennent chercher des stages et nous demander des conseils pour leur parcours. »

Lucie LEFEBVRE, Université Picardie Jules Verne, coordinatrice à la Chimie Verte Academy



« On a rencontré beaucoup de personnes intéressées par la Chimie Verte Academy, parce qu'on proposait et par ce qu'on pouvait leur apporter. On a aussi rencontré beaucoup d'entreprises très intéressées par le projet en lui-même, et qui aimeraient potentiellement nous rejoindre dans l'accompagnement des jeunes et du projet. »

Marie FOCONE, étudiante à l'Université de Poitiers, Chimie Verte Academy



« En tant qu'étudiante, le Village de la Chimie, c'est très intéressant : ça permet de donner envie aux plus jeunes de s'intéresser aux métiers scientifiques, à la chimie et surtout d'avoir un attrait pour l'environnement. Ça permet aussi de rencontrer les industriels, de savoir ce qui les intéresse chez les étudiants, leurs compétences,

leurs connaissances, et de pouvoir créer un réseau pour plus tard. »

Pauline ESTIVALEZES, Université de Toulouse, coordinatrice à la Chimie Verte Academy



« Je suis ici en tant que coordinatrice de la Chimie Verte Academy pour présenter les formations et les métiers auprès des étudiants. On est accompagné également d'un étudiant de Toulouse pour présenter tout cela durant le salon. La chimie verte a toute sa place sur le Village : au contraire, elle a beaucoup suscité d'interrogations. Beaucoup de jeunes, étudiants et collégiens, sont venus s'y intéresser, même si, pour eux, les métiers ce n'est pas forcément pour demain. C'était une belle découverte pour eux, j'ai l'impression, et très apprécié. »

Simon RICHARD, étudiant à l'Université Savoie Mont Blanc, Chimie Verte Academy

« Ce Village, c'est d'abord l'occasion de rencontrer des futurs étudiants, qu'on va pouvoir motiver à venir rejoindre la Chimie Verte Academy et les différents masters du consortium. Ensuite,



pour nous en tant qu'étudiants, c'est rencontrer des professionnels, si on est à la recherche de stages ou d'alternance, même juste pour étendre son réseau de manière générale. Et puis le but, c'est aussi d'aller à la rencontre des entreprises pour comprendre un peu mieux les enjeux de la chimie aujourd'hui et voir comment on peut faire avancer les choses en matière de chimie verte, en découvrant les nouvelles solutions proposées par ces entreprises pour y arriver au mieux. »

Yanis, élève en terminale STL interrogé à la sortie

« Franchement, c'était super : on a découvert plein de trucs. On a pu découvrir des nouvelles gammes de parfums, on a pu construire nos propres parfums, et on a découvert aussi des études qu'on pouvait poursuivre après notre filière. »

Mélina, élève en terminale générale interrogée à la sortie

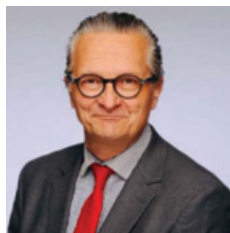
« J'ai trouvé le Village assez intéressant : il y avait de la diversité. On a pu voir l'armée, et aussi des études plus sur la chimie, avec des parcours bac+3 ou bac+5 – il y en avait pour tout le monde. On a fait plein d'activités et découvert des choses du quotidien qu'on ne connaissait pas : par exemple, on a appris comment certains objets étaient fabriqués. On a même pu faire nos parfums, franchement, j'ai trouvé ça intéressant. »

Aude Canet, enseignante en STL interrogée à la sortie

« Nous avons amené, avec une de mes collègues deux classes de terminale. Ce que j'ai trouvé très intéressant, c'est que, par rapport à un forum d'orientation plus classique, on se perd moins : on est plus amenés à aller discuter avec les gens. C'est un peu plus intimiste qu'un vrai salon de l'orientation. Même sans avoir préparé en amont, au fil des rencontres et des stands, on peut se balader, échanger et apprendre plein de choses sur les formations. Par exemple, je ne connaissais pas la Chimie Verte Academy. On a pas mal échangé, notamment avec une personne qui vient de finir son doctorat. Et je pense qu'il faut amener les élèves vers des domaines où il y a des débouchés : le développement durable, ce sont des choses où il va y avoir des métiers dans quelques années. Donc c'est important de les emmener là-dedans pour qu'ils découvrent aussi ça. J'ai découvert aussi l'EBI, je ne connaissais pas cette école d'ingénieurs. C'était bien d'avoir des étudiants qui discutent avec nos élèves de comment

ça se passe la première année après le bac ou encore Parcoursup : c'était très enrichissant ! »

Gilles LE MAIRE, président du Village de la Chimie des Sciences de la Nature et de la Vie, France Chimie Ile-de-France



« Mes impressions sur ces deux journées sont plutôt bonnes. J'ai été de stand en stand, d'entreprise en entreprise ou d'école en école : dans l'ensemble, les échos sont bons, avec ce choix du nouveau format mercredi-jeudi. Je craignais que les écoles et les professeurs ne nous suivent pas, et finalement ils m'ont expliqué qu'ils pouvaient très bien s'arranger pour venir le mercredi, le jeudi, ou les deux. Donc on est très contents. [...] Pourquoi ce thème « chimie verte » cette année ? Parce que c'est une tendance majeure. On l'a bien vu : toutes les entreprises sont tournées vers une chimie plus propre, plus nette et vers les grands défis : le réchauffement climatique, les perturbations atmosphériques... Les chimistes sont au rendez-vous ! Et pour tous ces défis, y compris la transition écologique, je pense que les chimistes seront à la hauteur : comme je le dis, les premiers « écolos », ce sont les chimistes ! [...] C'est très positif. Avec 13 000 visiteurs en présentiel sur deux jours, et 22 000 à distance, c'est un succès ! Et autre élément de satisfaction : la campagne sur les réseaux sociaux jeunes, sur TikTok et Instagram. On fera un décompte plus ajusté, mais on devrait atteindre prochainement les deux millions de vues. C'est formidable pour la chimie et son Village, qui ne tient que grâce à la mobilisation des entreprises et des écoles, présentes et venues de toute la France. »

Au fil des échanges, trois idées ressortent nettement : la chimie verte est désormais un cap partagé (procédés plus sobres, matériaux durables, réduction des risques, écoconception, étude des impacts, etc.), les métiers se diversifient (R&D, instrumentation, formulation, production, techniciens, doctorants, fonctions support) et l'attractivité passe par des rencontres incarnées, quand étudiants, enseignants, entreprises et institutions se parlent directement. À l'heure où les transitions s'accélérent, le Village de la Chimie confirme son rôle de passerelle : entre formation et emploi, entre innovation et industrie, entre curiosité et engagement. Les organisateurs ont annoncé une 24^e édition du Village de la Chimie au premier trimestre 2027 et attendent toujours plus d'acteurs et de visiteurs !

Propos recueillis sur le Village par la Chimie Verte Academy.

Définition du mois

Économie d'atomes (EA) : Notion introduite par Barry M. Trost en 1991 [1], l'économie d'atomes est une mesure de l'« efficacité synthétique » qui indique, à l'échelle de l'équation de réaction, quelle proportion des atomes des réactifs se retrouve dans le produit désiré, plutôt que dans les sous-produits. Elle est devenue le deuxième des 12 principes de la chimie verte, formalisés par Paul T. Anastas et John C. Warner en 1998 [2]. Pour calculer l'économie d'atomes, on équilibre l'équation bilan, on identifie le produit cible, puis on compare la masse molaire du produit d'intérêt à la masse totale de tous les réactifs engagés, en tenant compte des nombres stœchiométriques :

$$EA (\%) = \frac{\text{masses molaires pondérées des nombres stœchiométriques du produit d'intérêt}}{\text{masses molaires pondérées des nombres stœchiométriques de tous les réactifs}}$$

L'économie d'atome permet de comparer des voies de synthèse pour un même produit et d'orienter la conception vers des réactions plus « atom-économiques » plutôt que des voies générant de gros groupes partants ou des sels par exemple. Cependant, cet indicateur reste théorique et ne dit rien, à lui seul, des solvants, de l'énergie, des purifications, ni du rendement, donc il est recommandé de l'utiliser en complément d'autres indicateurs (« Process Mass Intensity/E-factor ») ou d'une Analyse de Cycle de Vie (ACV) [2] selon l'objectif.

[1] B.M. Trost, The atom economy: a search for synthetic efficiency, *Science*, **1991**, 254, p. 1471-7.

[2] Voir « Chimie Verte Insights » du numéro de février 2026 de *L'Act. Chim.*, p. 8-9.

Please join us in congratulating

Chemistry Europe Fellows Class 2024/2025



Lidia
Armelao



Wim
De Borggraeve



Catherine S. J.
Cazin



Denis
Jacquemin



Petra
de Jongh



Gilles
Gasser



György
Keglevich



Wolfgang
Kroutil



Inna
Melnyk



Pierangelo
Metrangolo



Adriaan J.
Minnaard



Jean-Christophe
Monbaliu



Constantinos
Neochoritis



Shigeyoshi
Inoue



Andreas
Orthaber



Teresa M. V. D.
Pinho e Melo



Joanna
Gościańska



Israel
Fernández López



Antonio M. Echavarren



Sebastian
Hasenstab-Riedel



Petr
Štěpnička



Tom
Ward



Chimie au féminin

Début octobre 2025, à l'Académie des sciences, on célébrait les 19^e Prix Jeunes Talents France L'Oréal-UNESCO *Pour les Femmes et la Science*, remis à 34 chercheuses prometteuses sélectionnées parmi près de 700 candidates par un jury d'académicien·nes (ce prix est doté de 15 000 € pour les doctorantes et 20 000 € pour les postdoctorantes). À cette occasion, nous avons rencontré les six chimistes identifiées parmi les lauréates – Léa Chocron, Rosa Diego Creixenti, Yolène Duchaudé, Marion Négrier, Manon Pujol et Anna Zhuravlova. C'est de cette rencontre avec des jeunes femmes talentueuses en tout début de carrière, aux profils très variés mais toutes animées par leur vision de la science, avec déjà une expérience à témoigner et très enthousiastes à l'idée de partager leurs recherches – que vous découvrirez dans les pages suivantes –, qu'est née l'idée de ce dossier spécial.

• Léa est entrée en classe prépa car elle aimait les sciences. C'est sa professeure de chimie qui lui fait apprécier ce domaine. En stage de master 1, elle découvre « *un peu par hasard* » le photochromisme et la piste de la chimie pour stocker l'énergie solaire, puis poursuit ses travaux en thèse au laboratoire de Photophysique et Photochimie Supramoléculaire et Macromoléculaire (ENS Paris-Saclay). « *C'est motivant de répondre à de vrais enjeux environnementaux actuels. J'ai l'impression de servir à quelque chose.* »

En parallèle, elle passe son agrégation en 2021. Après avoir soutenu sa thèse fin octobre 2025, animée par son envie d'enseigner (elle est d'ailleurs notamment co-autrice de *Chimie pour l'agrégation* à paraître en juin chez De Boeck Supérieur), elle est actuellement PRAG à l'Université de Versailles Saint-Quentin-en-Yvelines, avec une décharge pour faire de la recherche.

Le Prix L'Oréal-UNESCO est une reconnaissance. « *Dans mon parcours, je n'ai pas eu de grosses difficultés, mais j'ai ressenti un peu de misogynie. Il faut essayer de le faire remarquer; [ça doit faire partie de] l'éducation. [...] Je suis contente si je peux servir de modèle : une femme peut faire de la science en toute légitimité !* »

• Rosa a commencé ses études à l'Université de Barcelone puis en Suède, avant de revenir à Barcelone suivre un master de chimie organique conclu par un stage de sept mois en Nouvelle-Zélande, plus axé sur la chimie de coordination. Depuis avril 2023, elle a rejoint le Centre de Recherche Paul Pascal de Pessac en postdoctorat. Elle y travaille sur des aimants moléculaires, façonne la matière pour obtenir des matériaux magnétiques inédits (« *exotic state of materials* ») dédiés aux technologies quantiques.

Cette jeune chimiste au regard international « *aime se challenger* ». « *Ma priorité, c'est l'excellence, mais le [côté] personnel est toujours à considérer.* » Très proactive, elle « *a croisé de bons modèles* » et s'est sentie poussée par le « *Feel free!* » encourageant de ses encadrants.

Rosa considère le Prix L'Oréal-UNESCO comme un tremplin, la reconnaissance de sa devise « *High risk, high game* ». Pour elle, il est important qu'il y ait un plus grand nombre de femmes en sciences et elle montre aux jeunes femmes des zones rurales

d'où elle vient que c'est possible en leur apportant son témoignage. Son message : « *Reste curieuse, ne reste pas dans ta zone de confort : prends des risques !* »

• Pour Yolène, venue de Guadeloupe pour l'occasion, la filière scientifique est une vraie vocation ; depuis toujours, elle passe notamment son temps à créer des cosmétiques chez elle à partir de plantes créoles pour trouver des produits adaptés à ses cheveux. Après s'être tournée vers la biologie car elle avait « *intégré que la filière physique-chimie était réservée aux garçons* », elle se réoriente en master, où elle commence des recherches sur les antimoustiques. Sortie major de promotion, elle bénéficie d'une bourse du mérite et peut poursuivre ses travaux en thèse.

Durant son doctorat à l'Institut Pasteur de Guadeloupe, elle a développé des méthodes alternatives à partir de plantes créoles pour lutter contre les moustiques vecteurs de maladies. Sur les 22 plantes qu'elle a identifiées comme potentiellement intéressantes, elle en a déjà explorées six. Elle s'intéresse aussi de près à la problématique des sargasses, algues brunes nauséabondes qui étouffent la mangrove caribéenne et présentent des risques pour la santé. Son projet : « *partir d'un fléau pour lutter contre un autre.* »

« *Être chercheur dans les outremer, c'est très particulier, il faut être résilient ; on doit souvent attendre de longs mois avant [de pouvoir réaliser certaines analyses, obtenir des financements], jongler avec les coupures de courant [...] J'ai eu la chance de rencontrer beaucoup de modèles femmes de mon île.* »

Grâce à une bourse de 3 000 € d'un réseau de sororité guadeloupéen, le Club Soroptimist, elle a pu partir trois mois en Espagne pour compléter sa formation en formulation.

Le Prix L'Oréal-UNESCO lui a permis de « *rêver grand* », en l'aidant à développer une notion de légitimité dans ses recherches. Son mot d'ordre : « *Observe, tente et ose!* » : la qualité de son travail étant déjà actée, « *il faut de l'audace et du culot [pour poursuivre sa voie], c'est la partie qui me semble la plus compliquée.* »

Pleine de projets pour l'avenir, elle souhaiterait continuer sa formation au Canada pour se parfaire en phytochimie et appliquer des concepts qu'elle n'a vus qu'en théorie jusqu'à présent, avec un objectif à long terme : ouvrir un institut de recherche en Guadeloupe accueillant une partie musée, car il lui tient à cœur de transmettre au public. Et aujourd'hui, elle se dit « *Pourquoi pas ?* »

• Marion a soutenu sa thèse fin 2023 sur l'élaboration de matériaux poreux à haute valeur ajoutée à partir de déchets textiles au Centre de mise en forme des matériaux (Mines Paris – PSL). En postdoctorat, elle s'intéresse à un nouveau procédé pour fabriquer des substituts de plastiques en valorisant les déchets textiles.

« *[Depuis toute petite], j'adore bricoler, fabriquer des choses, concevoir.* » Après avoir commencé des études de vétérinaire, elle se reconvertit en ingénierie chimique. En 3^e année d'école, spécialisée en chimie verte, elle fait son stage de fin d'étude à l'EPFL de Lausanne dans un laboratoire de recherche sur procédés catalytiques et la biomasse. « *J'ai adoré*



De gauche à droite et de haut en bas : Léa Chocron, Rosa Diego Creixenti, Yolène Duchaudé, Marion Négrier, Manon Pujol et Anna Zhuravlova, lauréates du Prix Jeunes Talents France L'Oréal-UNESCO Pour les Femmes et la Science 2025. © Fondation L'Oréal.

la recherche et [j'ai voulu poursuivre par] une thèse en recyclage des textiles à l'École des Mines de Sofia Antipolis.» Ce qui lui manque alors, c'est « le côté applications » : le monde de l'entreprise l'attire beaucoup et elle suit une spécialisation « Entrepreneuriat Deeptech et Innovation » en 3^e année. Lauréate i-PhD 2024 de Bpifrance, le concours d'innovation de l'État, elle a déposé un premier brevet en 2025 et a créé une startup, Blendcel, pour commercialiser son savoir-faire et son biomatériau.

• Après un master en chimie verte à Strasbourg et une thèse, Manon est postdoctorante depuis 2023 au Laboratoire de Chimie des Polymères Organiques de l'Université de Bordeaux, où elle valorise les plastiques par une approche enzymatique innovante. Ce sujet pluridisciplinaire mêle biocatalyse, synthèse et techniques d'analyse. « Aujourd'hui, on arrive à dégrader le polystyrène à 99 % ; c'est un record [et on tend vers des produits à haute valeur ajoutée], mais « il reste encore beaucoup de choses à approfondir. [...] Un brevet est en cours d'évaluation. » Elle souhaite pouvoir passer les concours pour intégrer l'équipe de recherche. Prix Jeune étudiante 2022 de la Société Chimique de France*, cette jeune biochimiste s'est heurtée à un double frein dans son parcours : femme et autiste, mais elle a su « faire de son handicap une force ». « Oui la science est faite pour les femmes, foncez, osez ! La science a besoin de diversité. »

• Jeune chercheuse ukrainienne venue en 2020 à Strasbourg, Anna a soutenu sa thèse en septembre 2025 et poursuit ses recherches en postdoctorat dans l'équipe du Professeur Paolo Samorì à l'Institut de Science et d'Ingénierie Supramoléculaire de l'Université de Strasbourg. Elle y étudie des nanomatériaux bidimensionnés (système en feuillets, de grande surface mais de très petite épaisseur), très sensibles à l'environnement, chimiquement adaptatifs/réactifs. L'enjeu est de fonctionnaliser les surfaces et les bords des feuillets pour pouvoir notamment les utiliser comme capteurs de métaux lourds.

Prix de l'European Materials Research Society 2024, elle a participé aux *Lindau Nobel Laureate Meetings* en juillet 2025 en compagnie de trente prix Nobel.

Cette jeune femme au parcours très diversifié, curieuse d'esprit, a une vision large de la science. « J'aime surtout réfléchir puis appliquer. » Son projet à long terme est d'intégrer la recherche académique. Elle voit le Prix L'Oréal-UNESCO comme un tremplin qui lui apporte une vraie reconnaissance et le soutien financier qui va lui permettre de nouvelles expérimentations. Être femme en science, c'est souvent subir des petites remarques, des signaux qui s'accumulent et qui visent notre confiance en nous. Ce Prix, c'est aussi l'opportunité de faire partie d'un réseau de femmes scientifiques fédératrices, connectées.

Également début octobre, le projet porté par l'association Femmes & Sciences – 72 femmes de sciences pour la tour Eiffel – nous a été dévoilé et la Société Française de Chimie s'est montrée très active pour sélectionner les chimistes qui pourraient être mises à l'honneur. Vous pourrez découvrir celles qui ont été retenues pour le projet final, et aussi celles qui ne l'ont pas été, et en particulier le parcours de Marie-Anne Paulze Lavoisier.

Pour compléter ce dossier, il nous a paru important d'y associer le regard porté par la chercheuse en sciences cognitives Charlotte Jacquemot sur les discriminations de genre et la féminisation des filières scientifiques, et de mettre à l'honneur Aline Auroux, membre active de la SCF depuis de très nombreuses années, et Andrée Marquet qui nous a quittés le mois dernier.

Enfin, dans le premier article issu des *Reflets de la physique* dans le cadre de la collaboration entre les deux revues, l'astrophysicienne Audrey Chatain nous emmène voyager sur Titan, la plus grosse lune de Saturne.

Valérie Marvaud et Séverine Bléneau-Serdel

* Voir *L'Act. Chim.* 486, juillet-août 2023, p. 4 et l'épisode 6 de la série de podcasts « Vis ma chimie » coanimée par La Fédération Gay-Lussac et Réseau Jeunes de la SCF (<https://20ecolesdechimie.com/podcasts>).



Ressenti et discriminations de genre

Ce qui freine la féminisation des filières scientifiques

Charlotte JACQUEMOT

Le ressenti est une notion de plus en plus présente dans nos vies, utilisée notamment par les médias, les sondeurs mais aussi par les acteurs publics et académiques. Surtout, elle prend une place grandissante dans la prise de décision des électeurs et des responsables politiques. Dans le cadre du cycle de travaux initié par la Fondation Jean-Jaurès sur le sujet [1], et à l'occasion de la Journée internationale des femmes et des filles de science, Charlotte Jacquemot, chercheuse au CNRS et directrice du département d'études cognitives à l'École normale supérieure (ENS-PSL), a décrypté les ressentis qui freinent la féminisation des filières et des carrières scientifiques.

Les femmes scientifiques sont une minorité. Parmi les personnes qui font de la recherche, seulement 30 % sont des chercheuses en France en 2021 [2]. En mathématiques, ce chiffre est encore plus faible, avec seulement 15 % de chercheuses. Pourtant, si l'on regarde les résultats du baccalauréat en 2020, les filles ont de meilleures notes que les garçons dans toutes les séries, même scientifiques [3]. Alors pourquoi ces jeunes filles ne s'orientent-elles pas vers des carrières scientifiques [4] ?

Pour aborder cette question, il est essentiel de s'interroger sur le ressenti dominant des jeunes filles. Lorsque l'on interroge des élèves sur leur niveau de confiance, les filles déclarent avoir moins confiance en elles que les garçons dans les matières scientifiques, notamment en mathématiques, même si leurs résultats sont similaires [5]. Comment les filles, les femmes, perdent-elles confiance en elles-mêmes ?

Ce ressenti, observé chez les femmes, soulève plusieurs questions et fait écho au colloque de rentrée du Collège de France « Genre et sciences » en 2024. Quelle est l'origine de ce ressenti ? Reflète-t-il des difficultés réelles des femmes dans les matières scientifiques ? Quels sont les facteurs qui vont contribuer à son apparition ? Quelles sont les conséquences de ce ressenti pour les femmes et pour la société ? Existe-t-il des leviers pour modifier ce ressenti ?

Pourquoi parle-t-on d'un ressenti ?

Afin de déterminer si le manque de confiance en elles observé chez les jeunes filles dans les matières scientifiques s'explique par des compétences inférieures en sciences, une étude a testé des élèves de douze ans. Les élèves ont été séparés aléatoirement en deux groupes distincts : un groupe d'élèves a passé un test de géométrie, et l'autre un test de dessin. En fait, le test était exactement le même dans les deux groupes. C'est seulement la consigne « géométrie » ou « dessin » donnée aux élèves qui différait. On a ensuite comparé, dans chaque groupe, les performances des filles et des garçons. Dans le groupe « dessin », les filles réussissaient mieux que les garçons et, dans le groupe « géométrie », elles réussissaient moins bien [6]. Les deux tests étant identiques, quelle est alors la cause de ces moins bonnes performances des filles dans le groupe « géométrie » ? Interrogées sur la difficulté ressentie du test, les filles du groupe « géométrie » ont aussi trouvé la tâche plus difficile que celles du groupe « dessin ».



Couverture de *L'Actualité Chimique* de l'été 1993 reproduisant *La laborantine* de Léonard Tsuguharu Foujita (1886-1968), œuvre créée spécialement par l'artiste pour le laboratoire Roussel-Uclaf en 1959.

Ces performances inférieures dans la condition géométrie ne sont pas dues à des capacités différentes des filles et des garçons, mais à la crainte de ne pas réussir et à la perception des mathématiques comme une discipline difficile. On parle de « stéréotype ». Le stéréotype, c'est la croyance – fausse – que les filles et les femmes manquent de compétences en mathématiques/sciences, etc. Ce stéréotype affecte leurs performances dans une condition qui leur paraît difficile,

ici la géométrie. En dessin, les filles n'ont plus cette crainte et sont plus performantes que les garçons.

Ce ressenti apparaît vers l'âge de six ans, pendant la classe de CP [7]. C'est aussi vers cinq/six ans que les enfants intègrent implicitement les comportements associés à leur genre [8]. À l'entrée en CP, les filles ont les mêmes notes que les garçons en mathématiques. Mais six mois après la rentrée, on observe déjà une baisse de performances chez les filles qui s'accroît à la fin de l'année. L'école primaire va contribuer à renforcer les stéréotypes et à la mise en place de cette croyance que les filles ne seraient pas faites pour les matières scientifiques. Une croyance qui va persister toute la scolarité : après la réforme du baccalauréat avec l'apparition des spécialités, en 2021, en classe de terminale, 49 % des filles n'ont choisi aucun enseignement de spécialité scientifique contre 28 % des garçons. Seulement 32 % des filles ont pris deux enseignements de spécialité scientifique, contre 51 % des garçons [9]. Alors qu'entre 1986 et 2020, on assistait à une augmentation progressive de la part des bachelières scientifiques, la réforme du baccalauréat, avec le choix des spécialités, a entraîné une chute de 60 % des bachelières scientifiques en 2022 [10]. Même si à la fin de la scolarité, les filles vont quand même mieux réussir que les garçons au baccalauréat, le ressenti est toujours là. Alors que les capacités cérébrales des hommes et des femmes ne diffèrent pas [11], seulement une fille sur six aspire à travailler dans le domaine scientifique (contre un garçon sur quatre). De même, l'écart entre les filles et les garçons pour le plaisir pris à apprendre les sciences est en France l'un des plus marqués de l'OCDE [12].

La carrière des femmes scientifiques souffre aussi de ce ressenti, de cette idée que les femmes ne sont pas faites pour la science. Une grande partie de l'évaluation du travail des chercheuses et chercheurs scientifiques est basée sur la quantité d'articles produits et sur la renommée des journaux scientifiques dans lesquels sont publiés ces articles. Pour un nombre d'articles scientifiques équivalent dans des journaux scientifiques de renommée équivalente, les femmes sont toujours évaluées comme étant moins compétentes que les hommes. Dans le domaine scientifique, pour que les femmes soient évaluées comme étant aussi compétentes que les hommes, la réalité montre qu'elles ont dû avoir publié 2,5 fois plus d'articles scientifiques que les hommes [13]. De la même manière, avec un CV identique, une femme est moins bien évaluée qu'un homme : une expérience sur le recrutement d'un ou d'une collègue a été réalisée auprès d'universitaires. La moitié des universitaires a reçu le CV de John, l'autre moitié celui de Jennifer. Chaque universitaire devait noter différents critères selon les informations du CV (compétence, salaire, etc.). Le CV de John a été mieux évalué dans tous les critères que celui de Jennifer. Or, l'unique différence entre les deux CV était le prénom [14]. Ces données montrent que l'absence des femmes scientifiques résulte aussi de biais implicites qui affectent le recrutement et la promotion des femmes dans l'univers professionnel.

Comment ce ressenti se met-il en place ?

Dans les manuels scolaires de CP, les femmes représentent 22 % des personnes exerçant un métier, dont 3 % des personnes ayant un métier scientifique. À l'inverse, elles constituent 70 % des personnes représentées dans un registre domestique, faisant la cuisine ou le ménage [15]. À l'école, sans en avoir conscience, les enseignants et enseignantes

vont encourager les garçons à raisonner, à poser des questions, à prendre la parole et à se dépasser académiquement. Les filles sont moins encouragées à faire des choix scolaires audacieux et à s'orienter vers des métiers scientifiques [16]. Le choix de ne pas s'orienter vers la science pour les filles n'est donc pas basé sur des résultats scolaires, mais sur des stéréotypes culturels. L'audace réside dans la capacité à transgresser les rôles de genre attendus et à remettre en question les stéréotypes établis, à dépasser ses propres biais. De manière surprenante, la sous-représentation des femmes dans les domaines scientifiques et mathématiques est plus prononcée dans les pays les plus égalitaires, un phénomène connu sous le nom de « paradoxe de l'égalité des genres ». Cela s'explique par le fait que, dans les pays moins égalitaires, le principal défi pour les filles est d'accéder à l'éducation et de poursuivre des études supérieures. La transgression, c'est la décision de faire des études dans des pays où les femmes n'en font pas ou très peu. Une fois cet obstacle surmonté, le choix de la discipline tend à refléter davantage une préférence personnelle, moins influencée par les pressions sociales ou culturelles [17].

Cependant, l'école n'est pas le seul facteur. Très tôt dans l'enfance, qu'il s'agisse des activités proposées ou des rôles modèles, un processus de différenciation se met en place. Les activités qui sont proposées à un bébé varient selon son genre, avec des jeux de construction pour les garçons et des activités de lecture ou de dessin pour les filles [18]. Au sein de la famille, les interactions des parents avec leurs enfants dépendent du genre de leur(s) enfant(s). Par exemple, dans un musée scientifique, sans s'en rendre compte, les parents vont passer trois fois plus de temps à expliquer les faits scientifiques et les relations de causalité à leur fils qu'à leur fille [19]. L'analyse des requêtes Google [20] montre que les parents tapent deux fois plus souvent la question « Mon fils est-il un génie ? » que « Ma fille est-elle un génie ? » et que, au contraire, ils tapent deux fois plus souvent « Ma fille est-elle en surpoids ? » que « Mon fils est-il en surpoids ? », alors qu'il y a autant de garçons que de filles en surpoids... Ces questionnements des parents renvoient les filles à un impératif de « paraître », plutôt qu'à leur capacité à réfléchir et à agir.

Les médias ne sont pas en reste. Les émissions de vulgarisation scientifique, telles que *C'est pas sorcier* ou *E=M6*, sont majoritairement animées par des hommes, et mettent souvent en avant des scientifiques masculins, tandis que les femmes scientifiques y sont sous-représentées. Sur les plateaux télévisés, les expertes sont beaucoup moins présentes que les experts. Cette vision de la femme absente du domaine scientifique est également véhiculée dans les films, les séries, les dessins animés, les jeux vidéo, mais aussi dans les expositions scientifiques, ce qui renforce le ressenti des femmes.

L'invisibilisation des femmes scientifiques comme facteur aggravant

Sur Wikipédia, les biographies de scientifiques comptent moins de 15 % de femmes [21]. Ce déséquilibre reflète des biais historiques et culturels, où les réalisations des femmes scientifiques ont souvent été moins documentées et moins mises en avant. L'histoire révèle que ce sont les hommes, plus souvent que les femmes, qui laissent leur nom à la postérité. Ada Lovelace développe le premier programme pour calculer les nombres de Bernoulli avec un algorithme très détaillé en 1842, alors que c'est Alan Turing, dans les années 1930,



Mise en scène d'une expérience scientifique pour le jeune public du parc Vulcania (63). Photo : S. Bléneau-Serdel, 2025.

qui est considéré comme le fondateur des programmes informatiques. La chercheuse Sue Corkin, dont les travaux sur la mémoire humaine dans les années 1960 ont été pionniers et majeurs dans ce domaine, n'est même pas citée sur la page Wikipédia dédiée à la mémoire [22], alors que nombre de ses collègues masculins le sont.

À côté de cette invisibilisation « historique », les mécanismes d'exclusion perdurent. Ainsi, les prix Nobel sont majoritairement attribués à des hommes ; depuis que le prix Nobel existe, les femmes représentent 7 % des lauréats [23]. En 1962, le prix Nobel de médecine est décerné à James Watson, Francis Crick et Maurice Wilkins pour la découverte de la structure de l'ADN en 1953. Or, les premiers clichés de la structure en double hélice de l'ADN obtenus par diffraction de rayons X étaient ceux de Rosalind Franklin. À son insu, ces clichés seront dérobés et transmis à James Watson et Francis Crick, ainsi que ses rapports de recherche [24]. Malgré la contribution cruciale de Rosalind Franklin à la découverte de la structure de l'ADN et son article publié en 1953 dans le même numéro de la revue *Nature* que celui des articles de James Watson, Francis Crick et Maurice Wilkins, Rosalind Franklin ne sera pas lauréate du prix Nobel. Hélas, depuis les années 1960, malgré la prise de conscience de la place des femmes scientifiques, leur reconnaissance par le Nobel a peu évolué. En 2024, dix hommes ont reçu un prix Nobel, alors qu'aucune femme scientifique n'a reçu de prix. Plus surprenant, mais aussi symptomatique, le prix Nobel de médecine a été attribué à deux chercheurs pour leurs travaux sur le microARN, alors que Rosalind Lee, co-signataire et même première autrice

(c'est-à-dire la personne qui mène les recherches et rédige l'article) des travaux de 1993 mentionnés par le comité Nobel, n'a pas été associée au prix Nobel qui en a découlé [25]. En 2024, l'invisibilisation et l'exclusion des femmes scientifiques sont donc toujours une réalité.

Quelles sont les conséquences du ressenti ?

L'absence de modèles de femmes scientifiques, le fait que, de manière implicite, les filles ne soient ni poussées, ni soutenues dans des filières qui les porteraient vers des domaines scientifiques entraînent des choix d'orientation genrés. Les garçons et les filles se dirigent respectivement vers des filières considérées comme « masculines » – les sciences dures, l'informatique, la physique ou l'ingénierie –, ou « féminines » – les filières consacrées aux humanités, à la littérature, aux arts et aux sciences sociales...

Mais même lorsque le choix de la science est fait, contrairement aux garçons qui vont vers les sciences dures, les filles s'orientent vers les sciences du « care » (biologie, santé). Ces choix entraînent une sous-représentation des femmes dans les domaines scientifiques les plus rémunérateurs (finance, métier du numérique et de l'informatique, nouvelles technologies) et leur surreprésentation dans les métiers de la santé, du social et de l'éducation, qui sont beaucoup moins rémunérateurs.

Ces disparités de revenus ne sont pas uniquement le résultat des choix professionnels, mais aussi d'accès aux postes les plus rémunérateurs. En effet, même si les femmes sont plus diplômées que les hommes, leur taux d'emploi reste inférieur et elles sont sous-représentées dans les postes à responsabilités, quel que soit le corps de métier. Le suivi de la carrière scientifique des hommes et des femmes illustre bien cette dynamique. Alors qu'en doctorat les femmes représentent 50 % des étudiants, seulement 45 % vont devenir maîtresses de conférence, 30 % professeures des universités et 15 % présidentes d'université. Cette disparité renforce d'autant plus le ressenti des jeunes filles qui manquent de rôles modèles, que ce soit au sein des institutions scientifiques ou dans les médias, pour s'imaginer et s'engager dans des carrières scientifiques.

Au-delà de conséquences individuelles sur la vie des femmes, ce manque de parité a des conséquences à fois pour la science, mais aussi pour la société, l'économie et la gestion de crises. Dans le domaine scientifique, les travaux de recherche effectués par des équipes mixtes sont de meilleure qualité et plus cités que les travaux d'équipes non mixtes [26]. La présence des femmes au sein de directions d'entreprises est positivement corrélée à leur capacité de production et aux performances organisationnelle et financière [27]. Pendant la pandémie de Covid-19, les pays dirigés par des femmes présentaient une meilleure gestion de la crise sanitaire [28]. L'efficacité de la lutte contre le dérèglement climatique est corrélée à la proportion de femmes qui siègent dans les parlements nationaux [29]. Dans le domaine économique, le manque de mixité a également un coût. L'innovation, qui est un moteur de la croissance, est freinée par le manque de mixité. Si les femmes représentaient 50 % des professions de l'innovation, les répercussions sur le taux de croissance de la France seraient énormes. La parité dans l'innovation entraînerait une hausse de 70 % du taux de croissance [30]. Enfin, le coût des discriminations en France est estimé à 14 % du PIB [31].

Lutter contre les stéréotypes de genre aurait des conséquences sociales et économiques qui profiteraient à toute la société. Promouvoir la diversité de genre améliorerait individuellement la vie des femmes et favoriserait l'équité. Cela contribuerait aussi à une science de meilleure qualité, à une société plus innovante, mieux équipée pour faire face aux crises sanitaires et écologiques, tout en stimulant la croissance économique. Quels sont les leviers pour agir ?

Quelles solutions pour un autre ressenti ?

Ce sont toutes les strates de la société qui sont impliquées dans la construction de ce type de ressenti, à la fois l'école, les familles, les médias... Il n'y a pas une solution unique, mais différents niveaux sur lesquels des actions peuvent être menées.

L'école joue un rôle clé dans la construction et la consolidation des stéréotypes, et constitue donc une piste évidente sur laquelle agir. Les ouvrages scolaires diffusent des stéréotypes de genre très marqués. Une révision complète des manuels et des supports de cours serait nécessaire pour que les femmes ne soient plus assignées aux rôles domestiques et que les femmes scientifiques soient mises en avant autant que les hommes. Diverses ressources sont proposées pour accompagner les enseignantes et les enseignants, notamment par l'École normale supérieure, qui met à disposition des fiches sur des femmes scientifiques [32]. Ces fiches leur offrent des références concrètes à présenter et à citer auprès des élèves. Les biais observés chez les enseignantes et enseignants influencent les performances des enfants, notamment en mathématiques [33]. Une formation adaptée des enseignantes et enseignants avec une sensibilisation aux stéréotypes de genre permettrait également de lutter contre les biais implicites véhiculés par l'école, contre le ressenti des filles et contre les disparités de genre en sciences.

Si les filles ont du mal à se projeter dans le domaine scientifique, c'est aussi qu'elles manquent de rôles modèles de femmes scientifiques auxquels elles pourraient s'identifier. Les rôles modèles jouent un rôle important dans les choix d'orientation. L'intervention en classe de chercheuses scientifiques a des effets sur les choix d'orientation des lycéennes. Alors que la proportion des meilleures élèves filles en mathématiques qui s'orientent vers les classes préparatoires scientifiques après le bac est de 30 %, elle monte à 45 % après l'intervention en classe d'une chercheuse scientifique [34]. Les rôles modèles se trouvent également dans la culture populaire : la télévision, les séries, les films, YouTube, TikTok... Malheureusement, les rares femmes scientifiques présentes à l'écran sont souvent dépeintes de manière peu favorable, plutôt solitaires et pas très épanouies. Il est temps de montrer que les femmes scientifiques et équilibrées existent ! Sur Wikipédia, plusieurs initiatives, comme celle de Jessica Wade, le projet *Les sans pages* [35] ou le *WikiProject Women in Red* [36], cherchent à combler l'écart entre la présence des hommes et des femmes en créant et enrichissant les pages de femmes dans divers domaines, y compris les sciences.

Le mentorat est un dispositif qui a déjà fait ses preuves pour soutenir les femmes dans des carrières scientifiques, et qui gagnerait à être mis en place à grande échelle [37]. Les programmes de mentorat alternent des sessions individuelles, avec des mentors et mentores expérimentés, et des ateliers de formation. Ils proposent une écoute et des conseils personnalisés pour soutenir les filles et les femmes qui s'orientent dans le domaine scientifique.



Diffuser des modèles de diversité de genre dans la pratique de la science : une des solutions pour un autre ressenti. Photo : Mikhail Nilov – pexels.com

Les obstacles qui freinent l'accès aux sciences s'accumulent à chaque étape de la vie des femmes. Faire le choix de la science, c'est, pour les femmes, nager à contre-courant. Pour compenser l'effet du courant, réparer ces inégalités et rééquilibrer les nombreuses difficultés qui ne cessent de s'empiler au cours de la vie des femmes, l'instauration de quotas mérite d'être envisagée, notamment dans les formations post-bac. Garantir aux filles une sécurité d'accès aux cursus scientifiques après le bac pourrait encourager davantage d'entre elles à choisir des spécialités scientifiques au lycée, une étape cruciale où l'abandon des matières scientifiques par les filles devient particulièrement marqué depuis la réforme du bac et l'instauration des spécialités. Les quotas représentent un levier pour corriger les déséquilibres systémiques qui freinent l'accès des femmes à certaines carrières, en particulier dans les sciences.

Une réflexion devrait aussi être menée sur les parcours professionnels de celles qui deviennent mères. Au ^{xxi}^e siècle, la parentalité continue d'affecter la carrière des femmes scientifiques en ralentissant leurs travaux de recherche et en affectant leur production scientifique [38]. Cette étape de la parentalité va limiter l'accès à des postes à responsabilités et freiner la progression salariale des femmes, alors qu'elle n'a pas d'effet négatifs sur la carrière des hommes [39]. Une redistribution des charges parentales avec un congé paternité de la même durée que le congé maternité permettrait de rééquilibrer la charge et de ne pas renforcer l'écart entre les parents.

Enfin, pour que les femmes scientifiques soient aussi visibles que les hommes, il est essentiel de communiquer sans stéréotype de genre. De nombreuses études ont démontré l'impact de l'utilisation du masculin par défaut sur notre perception du monde. Dans une étude, des participantes et participants ont lu différentes phrases et ont ensuite estimé la proportion d'hommes et de femmes. Après avoir lu la phrase « Le rassemblement a réuni des mathématiciens », la proportion de femmes dans le rassemblement est estimée à 25 %. En revanche, lorsque la phrase était formulée ainsi : « Le rassemblement a réuni des mathématiciens et des mathématiciennes », l'estimation de la proportion de femmes atteint presque 40 % [40]. L'usage systématique du masculin tend à minimiser la présence des femmes et, dans le domaine scientifique, cela impacte d'autant plus leur visibilité et leur légitimité.

Bien que le ressenti des filles et des femmes quant à leur place dans les sciences ne reflète ni un manque de compétences, ni une réalité biologique, ce ressenti existe bel et bien et peut être mesuré scientifiquement. Cette perte de confiance des filles et des femmes en elles-mêmes est le résultat d'une construction culturelle profondément enracinée, qui imprègne chaque étape de la vie, de l'enfance à l'âge adulte, et traverse toutes les strates de la société. Ce ressenti est le marqueur de la société, une sorte de baromètre culturel, révélant les normes et les attentes implicites que la société a intégrées au fil du temps à l'égard des femmes. Toutefois, loin d'être figées, les représentations de la société peuvent évoluer, et de nombreuses possibilités d'actions sont envisageables pour déconstruire ce ressenti et contribuer à bâtir une société plus égalitaire.

Cet article a été initialement publié sur le site de la Fondation Jean-Jaurès le 10 février 2025*. Il est reproduit conjointement sur le site CultureSciences-Chimie et dans L'Actualité Chimique dans le cadre du dossier « Chimie au féminin », avec l'aimable autorisation de l'auteur et de la Fondation Jean Jaurès.

* www.jean-jaures.org/publication/le-ressenti-a-t-il-un-genre-decryptage-de-la-sous-representation-des-femmes-en-sciences

[1] www.jean-jaures.org/publication/la-france-du-ressenti-enquete-sur-une-notion-au-coeur-de-notre-epoque-2

[2] *L'état de l'emploi scientifique en France*, n°17, ministère de l'Enseignement supérieur et de la Recherche, édition 2023, <https://publication.enseignementsup-recherche.gouv.fr/eesr/FR>

[3] *Femmes et hommes, l'égalité en question*, Insee, édition 2022, www.insee.fr/fr/statistiques/6047805

[4] C. Policar, C. Jacquemot, Pourquoi si peu de femmes dans les carrières scientifiques ?, *The Conversation*, 11 juin 2023, <https://theconversation.com/pourquoi-si-peu-de-femmes-dans-les-carrieres-scientifiques-206793>

[5] C. Marc, O. Paris-Romaskevich, C. Perronet, *Matheuses. Les filles, avenir des mathématiques*, CNRS Éditions, 2024.

[6] P. Huguet, I. Régnier, Stereotype threat among schoolgirls in quasi-ordinary classroom circumstances, *J. Educ. Psychol.*, 2007, 99(3), p. 545-60, <https://psycnet.apa.org/doi/10.1037/0022-0663.99.3.545>

[7] *Qu'apprend-on des évaluations de CP-CE1 ?*, Conseil scientifique de l'Éducation nationale (CSEN), 2021, www.reseau-canope.fr/fileadmin/user_upload/Projets/conseil_scientifique_education_nationale/Note_CSEN_2021_03.pdf

[8] L. Bian, A. Cimpian, S.-J. Leslie, Gender stereotypes about intellectual ability emerge early and influence children's interests, *Science*, 2017, 355, p. 389-91, <https://doi.org/10.1126/science.aah6524>

[9] *Vers l'égalité réelle entre les femmes et les hommes, Chiffres-clés*, ministère chargé de l'Égalité entre les femmes et les hommes et de la Lutte contre les discriminations, édition 2023, www.egalite-femmes-hommes.gouv.fr/sites/efh/files/2024-03/Chiffres-clés-egalite-femmes-hommes-edition-2023.pdf

[10] M. Guenais, Comment la réforme du lycée éloigne les filles des maths et des sciences, *The Conversation*, 7 mars 2024, <https://theconversation.com/comment-la-reforme-du-lycee-eloigne-les-filles-des-maths-et-des-sciences-224773>

[11] G. Rippon, *The Gendered Brain: the new neuroscience that shatters the myth of the female brain*, Random House, 2019.

[12] OCDE, *Résultats de PISA 2015, L'excellence et l'équité dans l'éducation*, 2015, <https://doi.org/10.1787/9789264267534-fr>

[13] C. Wennerås, A. Wold, Nepotism and sexism in peer-review, *Nature*, 1997, 387, <https://doi.org/10.1038/387341a0>

[14] C.A. Moss-Racusin et al., Science faculty's subtle gender biases favor male students, *Proc. Natl Acad. Sci. USA*, 2012, 109, p. 16474-9, <https://psycnet.apa.org/doi/10.1073/pnas.1211286109>

[15] *Et si on apprenait l'égalité ? Étude des représentations sexuées et sexistes dans les manuels de CP*, Centre Hubertine Auclert, 2023, www.centre-hubertine-auclert.fr/sites/default/files/medias/egalitheque/documents/cha-synthese-etudecp-web.pdf

[16] M. Blanchard, S. Orange, A. Pierrel, *Filles + sciences = une équation insoluble ? Enquête sur les classes préparatoires scientifiques*, Éditions Rue d'Ulm, 2016.

[17] T. Breda, E. Jouini, C. Napp, G. Thebault, Gender stereotypes can explain the gender-equality paradox, *Proc. Natl Acad. Sci. USA*, 2020, 117, p. 31063-9, <https://doi.org/10.1073/pnas.2008704117>

[18] Rapport sur l'égalité entre les filles et les garçons dans les modes d'accueil de la petite enfance, Igas, 2012, www.igas.gouv.fr/sites/igas/files/files-spip/pdf/RM2012-151P_egalite_fille_garcon_petite_enfance.pdf

[19] K. Crowley et al., Shared scientific thinking in everyday parent-child activity, *Sci. Educ.*, 2001, 85, p. 712-32, <https://doi.org/10.1002/sce.1035>

[20] Seth Stephens-Davidowitz, Google, tell me. Is my son a genius?, *New York Times*, 18 janv. 2014, www.nytimes.com/2014/01/19/opinion/sunday/google-tell-me-is-my-son-a-genius.html

[21] C. Wagner et al., Women through the glass ceiling: gender asymmetries in Wikipedia, *EPJ Data Sci.*, 2016, 5, p. 1-24, <https://doi.org/10.1140/epjds/s13688-016-0066-4>

[22] [https://fr.wikipedia.org/wiki/M%C3%A9moire_\(psychologie\)](https://fr.wikipedia.org/wiki/M%C3%A9moire_(psychologie)) (consulté le 23/02/26).

[23] https://en.wikipedia.org/wiki/List_of_female_Nobel_laureates (consulté le 23/02/26).

[24] A. Kahn, L'hélice de la vie, *Med. Sci.*, 2003, 19, p. 491-5, <https://doi.org/10.1051/medsci/2003194491>

[25] O. Monod, Le prix Nobel a-t-il un problème avec les femmes scientifiques ?, *Libération*, 10 oct. 2024, www.liberation.fr/idees-et-debats/opinions/le-prix-nobel-a-t-il-un-probleme-avec-les-femmes-20241010_YFE4575MMRA47NVIVLJPFGLHQ/

[26] L.G. Campbell et al., Gender-heterogeneous working groups produce higher quality science, *PLoS One*, 2013, 8, e79147, <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0079147>

[27] *Diversity matters even more: the case for holistic impact*, McKinsey, 5 déc. 2023, www.mckinsey.com/featured-insights/diversity-and-inclusion/diversity-matters-even-more-the-case-for-holistic-impact#/

[28] U.S. Kambhampati, *Women leaders are better at fighting the pandemic*, Vox.eu, CEPR, 21 juin 2020, <https://cepr.org/voxeu/columns/women-leaders-are-better-fighting-pandemic>

[29] A. Mavisakalyan, Y. Tarverdi, Gender and climate change: do female parliamentarians make difference?, *Europ. J. Pol. Econ.*, 2019, 56, p. 151-64, <https://doi.org/10.1016/j.ejpoleco.2018.08.001>

[30] X. Jaravel, *Marie Curie habite dans le Morbihan. Démocratiser l'innovation*, Seuil, 2023.

[31] C. Mareuge, *Le coût économique des discriminations*, France Stratégie, 2016, www.strategie-plan.gouv.fr/publications/cout-economique-discriminations

[32] <https://jiffsens.wixsite.com/jiffs2023>

[33] E.A. Gunderson et al., The role of parents and teachers in the development of gender-related math attitudes, *Sex Roles*, 2012, 66, p. 153-66, <https://doi.org/10.1007/s11199-011-9996-2>

[34] T. Breda, J. Grenet, M. Monnet, C. Van Effenterre, How effective are female role models in steering girls towards stem? Evidence from French high schools, *Econ. J.*, 2023, 133, p. 1773-809, <https://doi.org/10.1093/ej/uead019>

[35] https://fr.wikipedia.org/wiki/Projet:Les_sans_pagEs (consulté le 23/02/26).

[36] https://en.wikipedia.org/wiki/Wikipedia:WikiProject_Women_in_Red

[37] L. Bonetta, Reaching gender equity in science: the importance of role models and mentors, *Science*, 2010, 327, p. 889-95.

[38] A.C. Morgan et al., The unequal impact of parenthood in academia, *Sci. Adv.*, 2021, 7, www.science.org/doi/10.1126/sciadv.abd1996

[39] K. Lacombe, *Les femmes sauveront l'hôpital*, Stock, 2023.

[40] L'estimation de la proportion de femmes dans une formulation utilisant le point médian « Le rassemblement a réuni des mathématicien-nes » est comparable à celle de la formulation avec la double flexion « Le rassemblement a réuni des mathématiciens et des mathématiciennes », et s'élève à presque 40 %. Voir H. Xiao et al., How fair is gender-fair language? Insights from gender ratio estimations in French, *J. Lang. Soc. Psychol.*, 2023, 42, <https://doi.org/10.1177/0261927X221084643>

Charlotte JACQUEMOT* est chercheuse en sciences cognitives au CNRS, directrice du département d'études cognitives de l'ENS-PSL (Paris) et référente égalité femmes-hommes de l'ENS. Elle a reçu le Prix de la délégation aux droits des femmes du Sénat 2025 pour ses travaux sur les discriminations de genre et la féminisation des filières scientifiques.

* charlotte.jacquemot@ens.psl.eu



72 femmes de sciences pour la tour Eiffel

Parcours de chimistes...

Le lundi 26 janvier dernier, dans les salons de l'Hôtel de Ville de Paris, a eu lieu la cérémonie au cours de laquelle, sous les auspices de l'association Femmes & Sciences, ont été présentés les noms des 72 femmes scientifiques qui vont orner, au-dessus de ceux des hommes, le premier étage de la tour Eiffel.

L'idée avait certainement germé avant mais nous ferons commencer l'histoire en 2021, lorsque Benjamin Rigaud, dans le cadre de l'association Défis Sorbonne⁽¹⁾ et alors guide faisant visiter la tour Eiffel, se voit questionné par une touriste sur l'absence de Marie Curie parmi les 72 noms des scientifiques figurant au premier étage de la tour Eiffel. C'est ensuite l'association Femmes & Sciences qui a pris le relais et en particulier Isabelle Vauglin, présidente de 2022 à 2024 et désormais vice-présidente. De nombreux échanges ont eu lieu entre la SETE (Société d'Exploitation de la Tour Eiffel), Femmes & Sciences et la Mairie de Paris. Un premier projet, appelé les « 40 sœurs d'Hypatie » a été proposé (voir encadré 1). Il s'est métamorphosé en 2025 en « 72 femmes de sciences », dont les noms figurent dans le *tableau I*. Le travail de dépose des noms sera réalisé à l'identique des hommes, en lettres de fonte d'aluminium dorées (voir *figure 1*).

Cet article n'a pas objet de raconter le déroulé de cette belle aventure, mais plutôt de se focaliser sur les chimistes qui ont été retenues, et aussi celles qui ne l'ont pas été.

Encadré 1

Les 40 sœurs d'Hypathie

Dans un premier temps, il avait été envisagé que les noms de femmes soient placés au deuxième étage de la tour Eiffel où figurent quarante niches. Le projet avait pris le nom des « 40 sœurs d'Hypatie », en référence à Hypatie, une philosophe, mathématicienne et astronome ayant vécu à Alexandrie au IV^e siècle et dont la vie romancée a donné lieu au film *Agora* de Alejandro Amenábar, sorti en 2009 (bien sûr caricatural et constellé d'erreurs historiques, ce péplum montre quelques aspects intéressants que nous n'avons pas la place de développer ici).

Dans cette première version du projet figuraient quatre chimistes (10 %) :

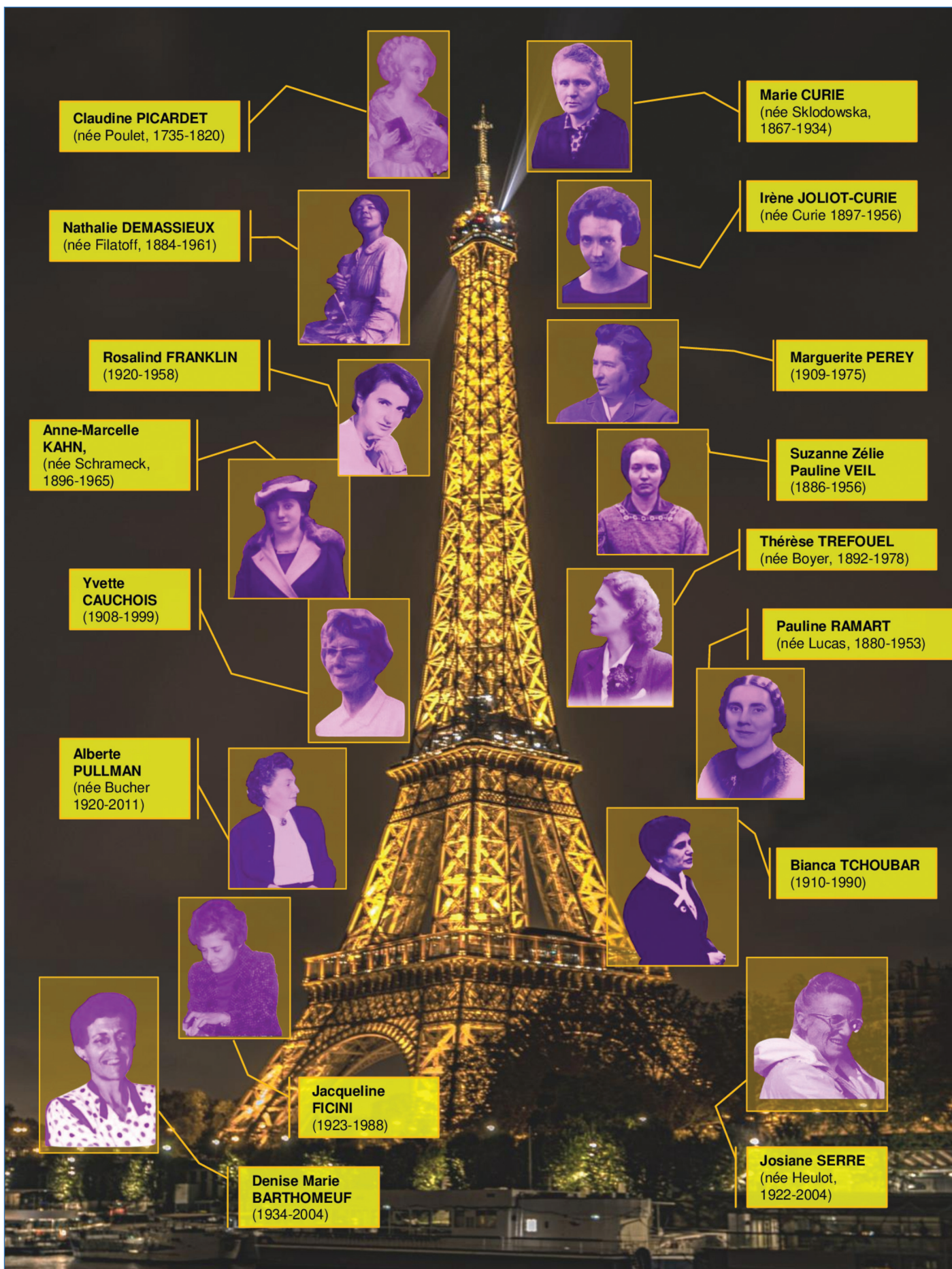
- Marie Meurdrac (1610-1680)
- Geneviève Thiroux d'Arconville (1720-1805)
- Marie-Anne Lavoisier (1758-1836)
- Irène Curie (Joliot-Curie) (1897-1956)

Seule Irène Curie (Joliot-Curie) a été retenue dans le projet final.

Tableau I - Les 72 femmes de sciences dont les noms figureront sur la tour Eiffel⁽²⁾.

(*) chimistes proposées par la SCF ; (**) chimistes proposées par d'autres institutions ; (+) à l'interface de la chimie et de la biologie.

Denise ALBE-FESSARD	Jacqueline FICINI (*)	Suzanne NOËL
Yvette AMICE	Rosalind FRANKLIN (**)	Yvonne ODIC
Jeanne BARET	Marthe GAUTIER	Isabelle OLIVIERI
Denise BARTHOMEUF (*)	Sophie GERMAIN	Marie-Louise PARIS
Madeleine BRÈS	Jeanne GUIOT	Marguerite PEREY (*)
Yvonne CHOQUET-BRUHAT	Geneviève GUITEL	Claudine PICARDET (*)
Simonne CAILLÈRE	Sébastien GUYOT	Alberte PULLMAN (*)
Yvette CAUCHOIS (*)	Claudine HERMANN	Pauline RAMART (*)
Edmée CHANDON	Andrée HOPPILLIARD	Lucie RANDOIN (+)
Marthe CONDAT	Marie-Louise DUBREIL-JACOTIN	Alice RECOQUE
Anita CONTI	Irène JOLIOT-CURIE (*)	Michelle SCHATZMAN
Eugénie COTTON	Geneviève JOURDAIN	Anne-Marcelle SCHRAMECK (**)
Radhia COUSOT	Dorothea KLUMPKE	Marie-Hélène SCHWARTZ
Odile CROISSANT	Lydie KOCH	Josiane SERRE (**)
Marie CURIE (*)	Colette KREDER	Alice SOLLIER
Augusta DÉJÉRINE	Nicole LAROCHE	Hélène SPARROW
Henriette DELAMARRE	Cornélie LEBON-DE BRAMBILLA	Bianca TCHOUBAR (*)
Georgette DÉLIBRIAS	Yolande LE CALVEZ	Marie-Antoinette TONNELAT
Nathalie DEMASSIEUX (**)	Paulette LIBERMANN	Thérèse TRÉFOUËL (*)
Rose DIENG	Marianne GRUNBERG-MANAGO	Agnès ULLMANN
Angélique DU COUDRAY	Nicole MANGIN	Arlette VASSY
Louise DU PIERRY	Cécile MORETTE	Suzanne VEIL (*)
Henriette MATHIEU-FARAGGI	Édith MOURIER	Jeanne VILLEPREUX
Jacqueline FERRAND	Ethel MOUSTACCHI	Toshiko YUASA



Claudine PICARDET
(née Poulet, 1735-1820)

Marie CURIE
(née Skłodowska,
1867-1934)

Nathalie DEMASSIEUX
(née Filatoff, 1884-1961)

Irène JOLIOT-CURIE
(née Curie 1897-1956)

Rosalind FRANKLIN
(1920-1958)

Marguerite PEREY
(1909-1975)

Anne-Marcelle KAHN,
(née Schrameck,
1896-1965)

Suzanne Zélie Pauline VEIL
(1886-1956)

Yvette CAUCHOIS
(1908-1999)

Thérèse TREFOUEL
(née Boyer, 1892-1978)

Alberte PULLMAN
(née Bucher
1920-2011)

Pauline RAMART
(née Lucas, 1880-1953)

Jacqueline FICINI
(1923-1988)

Bianca TCHOUBAR
(1910-1990)

Denise Marie BARTHOMEUF
(1934-2004)

Josiane SERRE
(née Heulot,
1922-2004)



Figure 1 - Projection de l'ajout d'une frise de femmes scientifiques sur le masque du premier étage, détail.
© Agence Pierre-Antoine Gatier, 2025, Insertion de la frise des grandes femmes, d'après photographie © 11h45, 2023.

Comme décrit dans l'encadré 2, Françoise Conan – actuelle présidente de Femmes & Sciences – a contacté la Société Chimique de France (SCF) afin que celle-ci propose des noms de chimistes, sur la base de critères de sélection (voir encadré 3). Des appels ont été lancés courant octobre 2025 et plusieurs entités y ont répondu, comme le groupe Égalité et le groupe Histoire de la Chimie, ainsi que la Société Française d'Histoire de la Chimie qui lui est étroitement associée.

Encadré 2

La commission

La commission de quinze personnes était co-présidée par Jean-François Martins, président de la Société d'Exploitation de la Tour Eiffel (SETE), et Isabelle Vauglin, vice-présidente de Femmes & Sciences. Elle a transmis son rapport le 5 septembre 2025 à la Mairie de Paris, qui l'a validé rapidement. C'est dans ce rapport que figure la proposition d'utiliser les niches du premier étage, au nombre de 72.

Rappelons que l'association Femmes & Sciences est présidée depuis 2024 par Françoise Conan, ancienne membre du conseil d'administration de la SCF (2018-2021) et initiatrice avec Geneviève Pourroy, en mars 2020, du groupe de travail « Parité »⁽³⁾. C'est elle, suivant les recommandations de la commission, qui a sollicité la SCF pour l'impliquer dans le projet.

Encadré 3

Les critères de sélection

Pour pouvoir être sélectionnées, les femmes scientifiques présentées devaient :

- Être décédées, avoir vécu « entre 1789 et nos jours » – ce qui exclut par exemple Marie Meurdrac (1610-1680) ou Émilie du Châtelet (1706-1749).
- Avoir marqué leur discipline par au moins une contribution majeure, ces disciplines concernant les sciences fondamentales et l'ingénierie.
- Être de nationalité française – on constate que des exceptions ont été faites lorsqu'un lien était démontré entre leurs travaux ou leur carrière et la France, comme pour Rosalind Franklin.
- Et que leur nom ne dépasse pas douze lettres – ce qui exclut par exemple Marie Geneviève Charlotte Thiroux d'Arconville.
- Ajoutons-en une dernière : que le nom ne figure pas déjà sur la tour Eiffel, comme ce fut le cas pour Marie-Anne Lavoisier, puisque le nom de Lavoisier y figurait déjà pour son mari.

Sur une vingtaine de chimistes proposées par la SCF, douze⁽⁴⁾ ont été gardées (*) et quatre autres ont été proposées par d'autres institutions (**). Sur 72 noms, cela fait un pourcentage de l'ordre de 22 %⁽⁵⁾ de chimistes, ce qui amène notre discipline comme la première représentée (voir tableau II et encadré 4).

Les femmes chimistes à travers l'histoire

Les chiffres ne laissent pas de place à l'équivoque : même si on prétend que la chimie est une science récente que l'on peut estimer au dernier tiers du XVIII^e siècle, les femmes sont absentes de son histoire visible avant la fin du XIX^e siècle. Marie Meurdrac, auteure d'un traité de *Chymie charitable pour les dames* au XVII^e siècle, a été citée ; elle

figure comme une exception. Peu de noms émergent exceptés Geneviève Thiroux d'Arconville, Marie-Anne Lavoisier ou Claudine Picardet (cf. infra). Toutes les autres chimistes sont postérieures ou contemporaines de Marie Curie, qui peut être considérée comme préceuse. Marguerite Perey et Suzanne Veil, mais aussi Toshiko Yuasa passeront par son laboratoire.

Un mot sur les origines sociales et géographiques. Vous le constaterez ci-dessous, les chimistes sélectionnées viennent de la France dans son ensemble et aussi de l'étranger, surtout les pays de l'Est. Il en est de même des origines sociales, la diversité y est.

Tableau II - Répartition des domaines scientifiques parmi les « 72 ».

	Femmes (2025)	Hommes (1889)
Chimie et physico-chimie	22 %	18 %
Ingénierie	17 %	19 %
Mathématiques et informatique	15 %	22 %
Médecine et apparenté	14 %	3 %
Physique	14 %	17 %
Biologie et apparenté	7 %	3 %
Sciences de la Terre et apparenté	7 %	13 %
Astronomie	4 %	5 %

Encadré 4

Comparaison avec les hommes

Autre époque, autres considérations : sur les 72 noms d'hommes figurant sur la tour Eiffel, treize sont affiliables à la chimie : Jean-Augustin BARRAL (1819-1884) ; Antoine CHAPTAL (1756-1832) ; Michel Eugène CHEVREUL (1786-1889) ; Louis DAGUERRE (1787-1851) ; Pierre Louis DULONG (1785-1838) ; Jacques-Joseph EBELMEN (1814-1852) ; Jean-Joseph Louis GAY-LUSSAC (1778-1850) ; Antoine LAVOISIER (1743-1794) ; Théophile-Jules PELOUZE (1807-1867) ; Henri Victor REGNAULT (1810-1878) ; Louis Jacques THÉNARD (1777-1857) et Charles-Adolphe WURTZ (1817-1884).

Quels aspects de la chimie sont illustrés ?

On constate dans le *tableau* ci-dessous que les différents aspects de la chimie sont représentés :

Chimie organique	4	Jacqueline Ficini, Pauline Ramart, Josiane Serre, Bianca Tchoubar
Chimie nucléaire	3	Marie Curie, Irène Joliot-Curie, Marguerite Perey
Spectroscopie et cristallographie	2	Yvette Cauchois, Rosalind Franklin
Chimie inorganique	2	Nathalie Demassieux, Suzanne Veil
Chimie pharmaceutique	1	Thérèse Tréfoüël
Chimie théorique	1	Alberte Pullman
Catalyse	1	Denise Barthomeuf
Chimie industrielle	1	Anne-Marcelle Schrameck
Difficile à attribuer	1	Claudine Picardet

Elles n'ont pas été retenues

Parmi les propositions faites par la SCF, n'ont pas été retenues :

• **Marie Geneviève Charlotte Thiroux d'Arconville** (née Darlus, 1720-1805), femme de lettres et de sciences.

• **Marie-Anne Pierrette Lavoisier** (née Paulze, 1758-1836), que l'on ne présente plus et qui fait l'objet d'un article d'Éric Jacques dans ce numéro (voir p. 26).

Et plus récemment :

• **Germaine Anne Cauquil**⁽⁶⁾ (1897-1983), physico-chimiste de Montpellier.

• **Hélène Émilie Metzger** (née Bruhl, 1889-1944), chimiste-historienne.

• **Marcelle Lafont** (1905-1982), ingénieure chimiste et résistante pendant la seconde guerre mondiale.

• **Filomena Nitti-Bovet** (née Nitti, 1909-1994), italienne, très active en chimie thérapeutique à l'Institut Pasteur, travaillant dans le même laboratoire que Thérèse Tréfoüël.

• **Jeanne Lévy** (1895-1993), chimiste organicienne devenue pharmacologue.

Elles ont été retenues

Sur propositions de la SCF

• **Denise Marie Barthomeuf**⁽⁷⁾ (1934-2004), lyonnaise et spécialiste en catalyse.

• **Yvette Cauchois** (1908-1999), originaire d'Indre-et-Loire et pionnière en spectroscopie des rayons X.

• **Marie Curie** (née Skłodowska, 1867-1934), que l'on ne présente plus.

• **Jacqueline Ficini** (1923-1988), née dans les Deux-Sèvres, chimiste organicienne récipiendaire du prix Le Bel de la SCF en 1972.

• **Irène Joliot-Curie** (née Curie, 1897-1956), que l'on ne présente plus non plus, prix Nobel de chimie pour la découverte de la radioactivité artificielle avec son mari, sous-secrétaire d'État à la Recherche Scientifique sous le Front Populaire.

• **Marguerite Perey** (1909-1975), née en Seine-Saint-Denis, dans un milieu modeste, diplômée de l'École d'enseignement technique féminin de Paris (voir *figure 2*), assistante de Marie Curie et découvreuse du francium.

• **Claudine Picardet**⁽⁸⁾ (née Poulet, 1735-1820), née à Dijon, connue seulement de son premier nom marital (le second étant Guyton de Morveau), chimiste, vulgarisatrice et traductrice de travaux scientifiques européens dans au moins quatre langues.

• **Alberte Pullman** (née Bucher, 1920-2011), chimiste théoricienne française pionnière en biochimie quantique, plusieurs fois proposée pour le prix Nobel de chimie (1963, 1965, 1968, 1969) sans jamais l'obtenir.

• **Pauline Ramart-Lucas** (née Lucas, 1880-1953), née à Paris. Issue d'un milieu très modeste, elle travaille comme fleuriste pour financer ses études qui l'amèneront à soutenir une thèse en chimie organique. Elle est la deuxième femme, après Marie Curie, à être nommée professeure titulaire à la Sorbonne.

• **Lucie Randoïn** (née Fandard, 1885-1960), originaire de l'Yonne, pas vraiment chimiste, plutôt biologiste et nutritionniste.

• **Bianca Tchoubar**⁽⁹⁾ (1910-1990), née en Ukraine, chimiste organicienne connue pour avoir promu les mécanismes réactionnels.

• **Thérèse Tréfoüël** (née Boyer, 1892-1978), née à Paris. Elle a travaillé en chimie thérapeutique à l'Institut Pasteur (comme Filomena Nitti).

• **Suzanne Zélie Pauline Veil** (1886-1956), née à Paris. Passée par le laboratoire de Marie Curie, elle est spécialisée en chimie inorganique.

Sur propositions d'autres sociétés

Les quatre chimistes ci-dessous n'ont pas été proposées par la SCF mais complètent très bien la liste :

• **Nathalie Demassieux** (née Filatoff, 1884-1961), originaire de Russie, spécialiste de chimie minérale. Grâce à un legs, le prix scientifique Nathalie Demassieux a été décerné pendant de nombreuses années par la Chancellerie des universités de Paris.

• **Rosalind Franklin** (1920-1958), cristallographe britannique formée notamment au CNRS où elle a passé trois ans entre 1947 et 1950, connue pour avoir été invisibilisée malgré le rôle important qu'elle a joué dans la découverte de la structure en double hélice de l'ADN.



Figure 2 - École Technique de l'Enseignement Féminin, 116 avenue d'Orléans, Paris 14^e, où fut formée Marguerite Perey.

- **Anne-Marcelle Kahn** (née Schrameck, 1896-1965), née à Paris, première femme ingénieure diplômée en 1919.
- **Josiane Serre** (née Heulot, 1922-2004), née à Lyon, chimiste organicienne, dernière directrice de l'École normale supérieure de jeunes filles, puis directrice par intérim de l'École normale supérieure de la rue d'Ulm, à Paris.

Quels parcours sont mis en évidence ?

Les parcours de toutes ces chimistes sont d'une grande diversité, difficile de résumer. Citons Josiane Serre qui fut directrice de l'ENS (Sèvres puis Ulm par intérim), Simone Veil, cheffe de travaux de l'École des hautes études, ou Anne-Marcelle Schrameck, la première femme diplômée d'une école d'ingénieur, les mines de Saint-Étienne – avant que la suivante ne le soit un demi-siècle après ! Une mention particulière pour Marguerite Perey qui commença sa formation à l'École Technique de l'Enseignement Féminin avant de faire une belle carrière et découvrir le francium, en 1939. On ne peut résister

au plaisir de relire cet article de Paris-soir datant du 31 janvier 1938 et citant Pauline Ramart-Lucas, Irène Joliot-Curie et Nathalie Demassieux (voir figure 3).

Les femmes sont à l'honneur et nous nous en félicitons tous. Le message porté par l'addition des 72 noms de femmes de sciences au-dessus de ceux des hommes sur la tour Eiffel en est un très beau symbole. Faisons tous en sorte que les différentes formes de discrimination et de domination s'amenuisent avec le temps. Rappelons que les femmes sont majoritaires dans les formations de chimie (56 % en STS, 57 % en BUT⁽⁹⁾, 62 % en master⁽¹⁰⁾, plus de 72 % dans les classes préparatoires intégrées de la Fédération Gay-Lussac⁽¹¹⁾). Donner aux femmes la place qu'elles méritent ne constitue-t-il pas la première étape d'une saine évolution de la société, à laquelle il faut ajouter l'inclusion sous toutes ses formes, la réduction des inégalités de toutes natures, mais notamment socioéconomiques et territoriales ? Est-il temps de s'ouvrir sur l'intersectionnalité ? Ça, c'est un autre débat...

Quatre femmes, maîtres de conférences

Il était une fois, dans une grande maison du faubourg Saint-Denis, une petite ouvrière en fleurs artificielles. Lorsque la besogne du jour ne l'avait point trop épuisée, au lieu de se distraire comme ses compagnes, elle suivait les cours du soir. C'est ainsi, à force de volonté et de courage, qu'elle parvint à passer son brevet simple, puis son brevet supérieur.

Elle était étonnée de ses succès, ses professeurs l'encourageaient, elle osa s'inscrire à la Faculté. Mais il n'était plus possible alors qu'elle continuât à travailler à l'atelier. Cette double tâche l'eût tuée. Elle trouva un emploi dans une école par correspondance, elle corrigea des devoirs et les cours les plus divers : elle fut chargée, un jour, de conférences destinées à former des candidats gendarmes.

Cependant, son intelligence avait frappé son professeur à la Faculté, M. Haller. Il aida l'étudiante à obtenir une bourse. Bientôt celle-ci devint l'assistante de M. Haller, elle gagna peu à peu ses grades, travailla avec le professeur Urbain, prépara son doctorat ès sciences. La porte de la réussite s'ouvrait tout doucement.

L'héroïne de cette histoire se nomme Mme Ramart. Elle est aujourd'hui maîtresse de conférences à la Faculté des Sciences de Paris.

Dans un bureau de la Faculté des Sciences

Nous avons tenté de la voir, Nous l'avons trouvée dans son calme bureau qu'elle aménagea près de son laboratoire. Elle est grande, infiniment simple, d'une bonne grâce absolue. Le regard est singulièrement acéré. Le menton et le front sont volontaires.

— Ma vie n'intéresse personne, déclara-t-elle avec douceur. Ce qui importe, ce sont mes cours, ce sont mes recherches, c'est mon « Abrégé théorique de chimie organique », puis mes travaux sur les synthèses moléculaires...

Elle regarde distraitemment, au mur, une sorte de grande carte flamboyante qui représente, par des arabesques compliquées, des couleurs contrastées et des dégradés, d'une part, les composés organiques de la nature, d'autre part, les composés obtenus par la science des hommes. Au centre, l'œuf de Marcelin Berthelot, où se fit la première synthèse, partie de l'hydrogène, du carbone et de l'acétylène. La carte s'étale, en pleine lumière, sur tout un mur du bureau, mais, tandis que les yeux de Mme Ramart suivent les laïcs symboliques des lignes, on sent que d'autres images se lèvent pour elle : les images de sa vie, justement, qu'elle hésite maintenant à livrer.

Quatre nominations pour toute la France

Aujourd'hui, deux nouvelles mènent grand bruit à l'Université. On les a commentées dans toutes les facultés de France, où certains, peu partisans des nouveautés, hochaient la tête comme s'ils eussent aperçu les premiers signes d'une révolution dangereuse. Simultanément, cinq jeunes femmes viennent d'être inscrites sur la « liste d'aptitude à l'Enseignement supérieur » et une jeune fille vient d'être nommée maîtresse de conférences à Montpellier. Cette accession féminine aux plus hauts postes de l'Université est remarquable en elle-même, mais plus encore peut-être par la rareté. Car, aujourd'hui, il n'est encore, avec Mme Ramart, que trois femmes en France enseignant dans les facultés. L'une n'est plus à présenter : c'est Mme Joliot-Curie, prix Nobel, ancien ministre. Une autre exerce depuis plusieurs années à Caen : c'est Mme Demassieux, maîtresse de conférences à la faculté des Sciences de cette ville.

Enfin, Mlle Tuzet, la dernière venue, vient d'être nommée titulaire de la chaire de zoologie à la faculté de Montpellier. Elle est le plus jeune maître de conférences de France.

Mlle Odette Tuzet eut une carrière toute différente de celle de Mme Ramart. Elle fut une enfant prodige, une étudiante brillante, un professeur remarqué. Elle a gagné, d'étape en étape, sa gloire présente. Après avoir été la meilleure élève de la Faculté de Montpellier, et y avoir passé sa licence en 1926, elle y revient, tout juste un peu plus de dix ans après, pour y être titulaire d'une chaire.

Nous avons été la voir chez elle : — Tout le mérite de cette réussite, nous confie cette jeune femme, qui est brune, souriante et charmante, revient à mes maîtres de la Faculté de Montpellier. Je dois aussi beaucoup au professeur Duboscq, de Paris, qui dirigea mes études pratiques à Bagnols-sur-Mer, au laboratoire Arago. J'ai d'abord été nommée assistante à Bagnols, après avoir passé ma thèse de doctorat en 1930. Puis j'ai été chef de travaux ici-même, où je succède aujourd'hui à M. le professeur Mathias. Je l'assisterai d'ailleurs dans ses travaux au laboratoire zoologique de Sète, dont il est le directeur.

— Avez-vous donc l'intention de quitter Montpellier ?

— Assurément non. Et mes cours ? Sète est bien près de Montpellier, et je pourrai m'y rendre souvent, pour nos recherches, mais ma véritable attache, c'est ici...

Mlle Tuzet a la vocation du savant. On sent que sa vie est toute tendue vers l'avenir des travaux qu'elle a commencés avec sa thèse sur « La double spermatogénèse des mollusques prosobranches ». Mais elle a un regard vers les devoirs d'étudiants qui attendent, sur son bureau, ses corrections.

— Et puis, je vais vous dire, j'adore enseigner, ajoute-t-elle.

Le plus jeune maître de conférences de France est peut-être aussi, le plus heureux.

George SINCLAIR.

Figure 3.

Source : www.retronews.fr/journal/paris-soir/31-janvier-1938/3/88602838-fa03-4228-8619-766fbb124b3e

Tous nos remerciements vont aux membres des bureaux du groupe Histoire de la Chimie de la SCF ainsi que de la Société Française d'Histoire de la Chimie, et particulièrement à Patrice Bret, si prompt à partager son immense culture, et à Françoise Conan, pour sa relecture.

⁽⁹⁾ Pour STS et BUT, données extraites de <https://data.enseignementsup-recherche.gouv.fr/pages/parcoursupdata>

⁽¹⁰⁾ Données extraites de www.data.gouv.fr/datasets/monmaster-2024-2025

⁽¹¹⁾ Données extraites de <https://20ecolesdechimie.com/4098-2>

Notes

Tous les sites ont été consultés le 24/02/2026.

⁽¹⁾ www.sorbonne-universite.fr/associations/defis-sorbonne-ads

⁽²⁾ www.femmesetsciences.fr/_files/ugd/10ca83_d5afc59da3df433d9727362b3a676326.pdf

⁽³⁾ N. Avarvari, F. Conan, D. Luneau, G. Pourroy, La parité à la SCF, *L'Act. Chim.*, **2020**, 449, p. 63, <https://new.societechimiquedefrance.fr/numero/la-parite-a-la-scf-p63-n449>

⁽⁴⁾ Toujours à titre de comparaison, Wikipédia propose 28 199 biographies de chimistes homme (85 %) et 5 144 biographies de chimistes femmes (15 %). Données extraites par <https://query.wikidata.org> le 23/02/2026.

⁽⁵⁾ Ce pourcentage est bien évidemment entaché d'incertitude car les frontières entre les disciplines ne sont pas toujours nettes et les parcours comme les carrières, surtout à l'interface chimie-médecine, influent. C'est le cas de Lucie Randoïn.

⁽⁶⁾ Mlle le Professeur Germaine Cauquil (1897-1983), *L'Act. Chim.*, mai **1983**, p. 70-71, <https://new.societechimiquedefrance.fr/wp-content/uploads/2019/12/1983-102-mai-p70-scf.pdf>

⁽⁷⁾ M. Breyse, F. Fajula, Denise Barthelemy (1934-2004), *L'Act. Chim.*, **2005**, 287, p. 64, <https://new.societechimiquedefrance.fr/numero/denise-barthelemy-1934-2004-p64-n287>

⁽⁸⁾ P. Bret, Madame Picardet, traductrice scientifique ou cosmétique des Lumières?, *Pour La Science*, **2014**, 446, www.pourlascience.fr/sd/histoire-sciences/madame-picardet-traductrice-scientifique-ou-cosmetique-des-lumieres-8227.php

Bibliographie

• J. Apotheker, L. Simon Sarkadi (ed.), *European Women in Chemistry*, Weinheim: Wiley-VCH, **2011**, 232 p.

• A. Lykknes, B. Van Tiggelen (ed.), *Women in their Element: Selected Women's Contributions to the Periodic System*, World scientific, **2019**, 532 p.

• M. Ogilvie, J. Harvey (ed.), *The Biographical Dictionary of Women in Science: Pioneering Lives from Ancient Times to the Mid-20th Century*, Volume 1 A-M, **2000**, 1640 p., Volume 2, L-Z, **2014**, 2008 p.

• C.M.C. Haines, H.M. Stevens (ed.), *International Women in Science: A Biographical Dictionary to 1950*, ABC-Clío, **2001**, 404 p.

Xavier BATAILLE est professeur de chimie à l'ENCPB, 11 rue Pirandello, 75013 Paris.

* xavier.bataille@encpb.fr



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



METTRE EN RÉSEAU

Une **communauté** de chimistes en France et dans le monde



REPRÉSENTER

Les chimistes et leurs disciplines du **monde académique** à l'**industrie**, en passant par les **pouvoirs publics**



INFORMER

Via une **newsletter** mensuelle, notre revue **l'Actualité Chimique** et un large **réseau de publications**



SOUTENIR

Dans l'**aide à l'emploi**, l'organisation de **manifestations scientifiques**, ainsi qu'en valorisant nos membres par des **prix et distinctions**



Une femme de science à part : Marie-Anne Paulze (1758-1836), épouse Lavoisier (1771-1794)

Éric JACQUES

Résumé Cet article revient sur le parcours d'une femme savante, Marie-Anne Paulze (1758-1836), dont les activités scientifiques entre 1772 et 1794 aux côtés de son premier mari Antoine-Laurent Lavoisier (1743-1794) – tous deux alors engagés dans le développement d'une nouvelle chimie – méritent d'être analysées et réinterrogées à la lumière des recherches récentes.

Mots-clés Marie-Anne Paulze, histoire de la chimie, collaboration scientifique, femmes en science, chimie du XVIII^e siècle.

Abstract Marie-Anne Paulze (1758-1836), épouse Lavoisier (1771-1794)

This article revisits the scientific activities of Marie-Anne Paulze (1758–1836) between 1772 and 1794. With her first husband, Antoine-Laurent Lavoisier (1743–1794), she was deeply involved in the development of a new chemistry, an involvement that deserves to be analyzed and reexamined in light of recent research.

Keywords Marie-Anne Paulze, history of chemistry, scientific collaboration, women in science, 18th century chemistry

<https://doi.org/10.63133/scf.act-chim.2026.512.02>

Femme de science, artiste, dessinatrice et traductrice, Marie-Anne Paulze (1758-1836) [1] occupe une place singulière dans l'histoire des sciences de la fin du XVIII^e siècle et du début du XIX^e. Mariée en premières noces à Antoine-Laurent Lavoisier (1743-1794) [2], elle assume son rôle d'épouse tout en s'affirmant comme femme d'art et de science, conjuguant ses efforts à ceux de son mari pour diffuser la nouvelle chimie qu'il s'emploie à « révolutionner » [3]. À la fois centrales et périphériques, les activités de Marie-Anne Paulze relèvent ainsi de la collaboration scientifique, de la propagation des savoirs et de la sauvegarde pérenne d'une mémoire – celle de Lavoisier et de son œuvre.

Les travaux des historiens Denis Duveen et Roald Hoffmann et des historiennes Keiko Kawashima, Rebecca Cypess, Francesca Antonelli dans les années 2000 à 2020 ont contribué à affiner, mais aussi à réinterroger, la perception historiographique du rôle de Madame Lavoisier⁽¹⁾. Cet article revient sur le parcours d'une femme savante dont les activités scientifiques entre 1772 et 1794 méritent d'être analysées à la lumière de ces recherches récentes. Il s'agit moins d'ajouter une figure féminine à la galerie des acteurs de la « révolution chimique » que de comprendre les modalités concrètes de son engagement scientifique, éditorial et mémoriel, ainsi que les stratégies de visibilité, d'effacement et de transmission qu'elle met en œuvre au sein d'un collectif savant largement masculin.

Prologue, Madame Lavoisier

Unique fille de l'ancien commissaire et procureur du roi Jacques Paulze (1723-1794) – qui a également trois fils qu'il élève seul après le décès de son épouse en 1761 –, Marie-Anne quitte le couvent de sa ville natale de Montbrison à la suite de la nomination de son père à la Ferme générale et le rejoint à Paris en 1769, où il s'installe rue Richelieu. À presque douze ans, elle est décrite comme une « *adolescente vive et éveillée, féminine et primesautière* [...] [qui] *a les manières et le savoir-vivre d'une dame* » [1a].

Marie-Anne devient rapidement la maîtresse de maison du foyer paternel. Elle organise la domesticité, veille au confort familial et reçoit les invités. Dépeinte comme une jeune femme pétillante, pleine d'énergie, mesurant environ un mètre cinquante-cinq, aux yeux bleus presque pâles, de taille moyenne, aux cheveux bruns dissimulés sous une perruque blonde, elle évolue dans un milieu social particulièrement dense. Au salon de son père, elle côtoie des figures de premier plan de l'administration, de la noblesse et du monde savant : Turgot, futur contrôleur général des finances, les frères Trudaine, fils du comte de Montigny-Lencoup, ou encore Louis-Alexandre de la Rochefoucauld d'Enville, membre honoraire de l'Académie des sciences. Elle y rencontre également le physiocrate Pierre-Samuel Dupont de Nemours (1739-1817) et des académiciens tels que le mathématicien et futur homme politique Nicolas de Caritat, marquis de Condorcet (1743-1794).

En 1771, elle échappe grâce à son père à un mariage arrangé par l'abbé Terray (1715-1778) et sa maîtresse, la baronne de la Garde, qui souhaite que Marie-Anne épouse le comte d'Amerval qui n'est autre que son frère. Au comte « *agreste et dur, une espère d'ogre* » âgé de cinquante ans pour lequel elle « *a une aversion décidée* » [4a], Marie-Anne préfère la compagnie d'un autre habitué du salon paternel, lui aussi membre de la Ferme générale, alors inspecteur aux tabacs : Antoine-Laurent Lavoisier, jeune homme de vingt-huit ans, déjà reconnu pour ses talents scientifiques.

Mariée à l'âge de treize ans⁽²⁾, Marie-Anne s'installe avec son époux dans la maison acquise par le père de Lavoisier, à l'angle de la rue des Bons-Enfants et de la rue Neuve-des-Bons-Enfants. L'abbé Terray, finalement conciliant, participe à l'organisation du mariage et accueille les invités dans les salons de l'hôtel d'Aumont, où plus de deux cents personnes sont réunies [4b]. Ce cadre mondain et institutionnel constitue le premier espace dans lequel Marie-Anne Paulze apprend à manier les codes sociaux, relationnels et symboliques qui structureront durablement son engagement ultérieur dans la vie scientifique.

La découverte et la formation en chimie ancienne et nouvelle

Dans la maison du couple, Marie-Anne se charge de l'aménagement et de la décoration, tandis qu'Antoine-Laurent fait installer un laboratoire dans une dépendance, de l'autre côté de la cour, ou dans une pièce spécialement aménagée. Sa chambre lui sert par ailleurs de bureau pour ses affaires à la Ferme générale ainsi que pour la rédaction de ses rapports scientifiques destinés à l'Académie des sciences. Marie-Anne sait déjà que son mari, au-delà de son intérêt pour la géologie, s'investit de plus en plus dans l'étude de la chimie, discipline dont il cherche à percer les mécanismes fondamentaux.

Dès 1769, Lavoisier a montré que l'eau ne se transformait pas en terre (*Mémoire sur la Nature de l'eau et sur les expériences par lesquelles on a prétendu prouver la possibilité de son changement en terre*) [5a], rompant ainsi avec l'héritage alchimique et la conception d'une chimie fondée sur les quatre éléments-principes – air, terre, feu et eau. En poursuivant ses recherches sur les phénomènes de combustion, il en vient à interroger la nature et la composition de l'air – ou plutôt des *airs* (*Mémoire sur la nature du principe qui se combine avec les métaux pendant leur calcination*) [5b]. Marie-Anne, loin de se tenir à l'écart de ces travaux, est progressivement initiée par son mari à ses recherches expérimentales et à ses interrogations théoriques. Entre 1772 et 1774, plusieurs séries d'expériences sur la combustion ont lieu sous le patronage de l'Académie des sciences, auxquelles Lavoisier participe activement : chez Pierre Joseph Macquer (1718-1784), chez Philibert Trudaine de Montigny (1733-1777) [6a], ou encore dans le Jardin de l'Infante au Louvre [7a]. Initiée à la théorie du phlogistique formulée par Georg Stahl (1659-1734)⁽³⁾, et plus largement à la chimie à l'aide des *Éléments de Chymie* de Macquer, Marie-Anne connaît également les positions divergentes de son mari. Lavoisier est convaincu qu'un principe de conservation de la matière doit gouverner l'ensemble des opérations chimiques⁽⁴⁾. Cette intuition le conduit à formuler l'hypothèse selon laquelle l'augmentation de masse observée lors de la calcination des métaux résulterait non d'une perte, mais d'une combinaison entre le corps combustible et un constituant de l'air. Dès lors, la théorie du phlogistique – cette « matière du feu » censée s'échapper du corps en combustion sous forme de lumière ou de chaleur, et alors largement acceptée par la communauté des chimistes – lui apparaît erronée⁽⁵⁾. Si les expériences auxquelles il assiste tendent partiellement à conforter cette position, elles demeurent cependant, dans un premier temps, insuffisantes pour s'en convaincre.

Un tournant important survient en septembre 1774, lorsque le physicien et philosophe britannique Joseph Priestley (1773-1804) séjourne à Paris. Hébergé chez Trudaine de Montigny, il est également invité à dîner chez les Lavoisier, où Marie-Anne reçoit les hôtes anglais et américains selon les usages de leurs pays. Comme le rapporte Priestley lui-même, lorsqu'il évoque ses expériences sur la décomposition du rouge de mercure en mercure métallique et en un « air éminemment respirable », il capte immédiatement l'attention de Marie-Anne et de son mari, tous deux désireux d'en apprendre davantage [6b].

Pour Francesca Antonelli, cet épisode illustre à la fois les pratiques sociales du couple Lavoisier et l'intégration effective de Marie-Anne aux activités scientifiques de son mari. La sociabilité savante, loin de constituer un simple décor mondain, devient ici un espace d'apprentissage, de circulation des

savoirs et de formation scientifique informelle, dans lequel Marie-Anne trouve progressivement sa place [9a].

Marie-Anne Paulze et sa position dans le groupe de l'Arsenal

Au travers des dîners, des discussions, des séances de l'Académie des sciences auxquels elle assiste, la formation initiale de Marie-Anne est informelle. En 1776, les Lavoisier s'installent dans des appartements situés au Petit Arsenal, à l'Hôtel des Poudres, à proximité immédiate de la Bastille. Lavoisier, récemment nommé régisseur général des poudres et salpêtres, y fait aménager un nouveau laboratoire [2a, 10]. Il y rassemble un matériel de plus en plus sophistiqué – balances de précision, thermomètres, aéromètres, machines à glace, calorimètres, gazomètres – traduisant une inscription croissante de la chimie dans une pratique expérimentale rigoureusement instrumentée.

Déterminé à élucider les mécanismes des réactions de combustion, Lavoisier s'entoure progressivement de collaborateurs issus à la fois du monde académique et de milieux techniques, artisans et ouvriers spécialisés compris [2b, 7b]. Un groupe de savants se forme peu à peu autour de lui, convaincus progressivement par ses hypothèses [11]. Parmi les premiers collaborateurs figure Jean-Baptiste Bucquet (1746-1780) [12a], avec lequel Lavoisier met en place un programme systématique d'expérimentation portant sur l'ensemble des phénomènes connus de combustion. Dès 1777, il est convaincu qu'une seule partie de l'air atmosphérique est responsable, par combinaison – et non par perte –, de la formation des chaux issues de la calcination des métaux⁽⁵⁾.

Marie-Anne est alors pleinement présente au laboratoire. Son rôle dans le déroulement, la consignation et l'organisation des expériences a longtemps été sous-estimé, notamment à la suite des premières descriptions proposées par Marcellin Berthelot (1827-1907), qui rappelait l'existence de « *treize grands registres de laboratoire décrivant une partie des expériences réalisées entre 1772 et 1788* » [3a].

L'analyse fine de ces cahiers a cependant renouvelé l'appréciation du rôle de Marie-Anne Paulze. Elle y consigne de manière suivie les résultats expérimentaux, et son écriture occupe une place bien plus importante que ce que laissait supposer une lecture superficielle. Comme le montre Francesca Antonelli, Marie-Anne se voit confier la « *charge progressive d'un espace de plus en plus important dans la gestion des Registres [...]* » et « *l'année 1777 semble représenter une sorte de tournant. À partir de cette date, des gestes essentiels à la construction de l'archive – comme la mise en ordre, accumulés par la rédaction de notes et de billets – s'accompagnent de pratiques d'écriture plus complexes. Ensemble, ces éléments lui confient la gestion de l'intégralité de la comptabilité rendue de l'expérience* » [13a]. En participant, à l'Arsenal, aux cours que Bucquet dispense à un petit cercle d'élèves, avec le concours de Lavoisier, Marie-Anne reçoit dès lors une formation scientifique de tout premier ordre. Il ne s'agit plus seulement d'apprendre une chimie existante, mais de maîtriser les fondements théoriques et les arguments expérimentaux propres à s'opposer à la doctrine du phlogistique.

Une formation scientifique et artistique polyvalente

À mesure que le groupe de l'Arsenal s'étoffe – accueillant notamment Fourcroy, Laplace, Monge, Meusnier, Berthollet, Hassenfratz, Adet, Guyton de Morveau ou encore Seguin

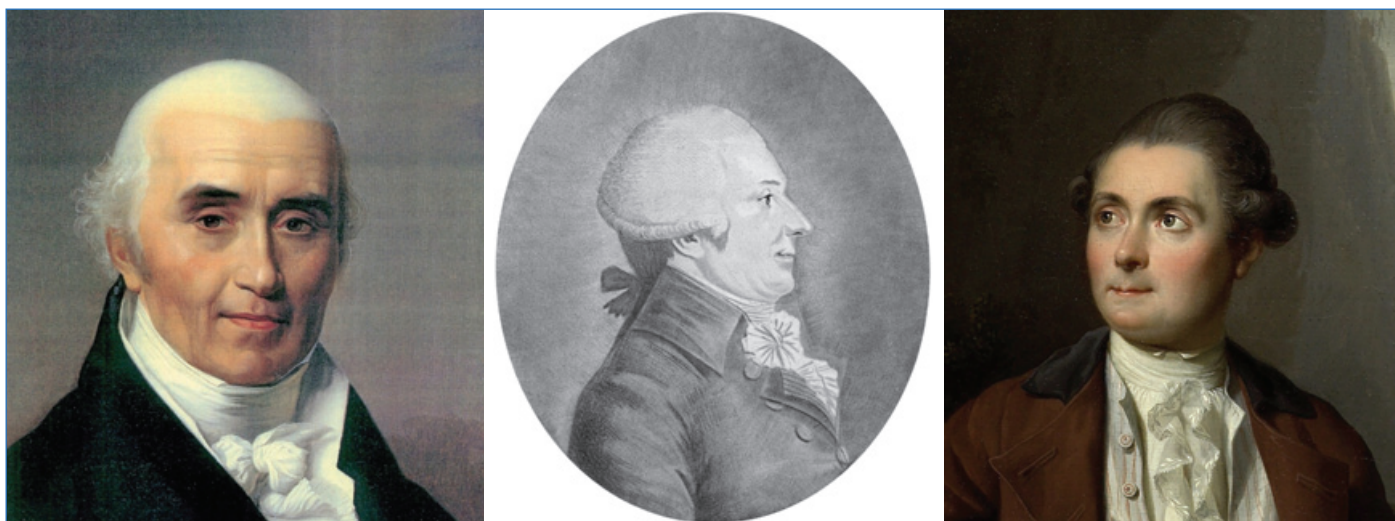


Figure 1 - De gauche à droite : Marc-Auguste Pictet (huile par Firmin Massot, 1809), Louis-Bernard Guyton de Morveau (gravé par Edme Quenedey, 1737), Horace-Bénédict de Saussure (peint par Jens Juel, 1778), quelques-uns des correspondants scientifiques de Marie-Anne Paulze-Lavoisier.

[14a] –, les Lavoisier mettent en place une véritable dynamique de diffusion et de légitimation de la nouvelle chimie. Celle-ci repose en grande partie sur des réunions régulières et des invitations à dîner, organisées chaque lundi, alternant entre le laboratoire et le salon scientifique. Dans chacun de ces espaces, l'un des deux membres du couple excelle, combinant pratiques expérimentales, sociabilité savante et mise en scène intellectuelle [15].

« Les talents de société » de Marie-Anne contribuent à sa grande réputation. Ceux qui la fréquentent savent qu'elle cherche à être estimée pour sa personnalité mais aussi pour son intelligence [16a]. Pour y parvenir, elle cultive conjointement les arts et les sciences. Formée dans sa jeunesse au dessin, à la musique, à la danse, à l'histoire, au calcul et au clavecin, elle poursuit ses apprentissages une fois mariée. Elle prend un répétiteur pour le latin, apprend l'italien et l'anglais, langues qu'elle maîtrise suffisamment pour les lire et les traduire.

À partir de 1785, Marie-Anne assiste aux cours et conférences du Lycée, institution de la diffusion savante parisienne notamment soutenue par Lavoisier [6c, 17a]. L'année suivante, elle s'inscrit à un cours de dessin dispensé par Jacques-Louis David (1748-1825) au Palais-Royal. La découverte, en 2018, par Marie-Laure Saulnier, d'un autoportrait conservé dans un ouvrage de la bibliothèque universitaire de Bordeaux [6d] confirme non seulement ses talents de dessinatrice, mais aussi sa maîtrise de la gravure sur cuivre⁽⁷⁾.

Cette formation scientifique et artistique polyvalente ne relève pas d'un simple accomplissement mondain. Elle constitue un socle essentiel à l'ensemble des activités de Marie-Anne Paulze : traduction, illustration, archivage, sociabilité savante et mise en visibilité de la nouvelle chimie. Elle participe ainsi pleinement à la construction d'une autorité intellectuelle singulière, fondée sur l'articulation étroite entre savoirs, pratiques et médiations.

À la reconnaissance croissante dont bénéficie Marie-Anne Paulze au sein du groupe de l'Arsenal pour ses compétences au laboratoire et dans le salon s'ajoute ce que Francesca Antonelli désigne comme ses « stratégies de persuasion ». Celles-ci se déploient d'abord dans l'espace expérimental, sous la forme de démonstrations dites passives – lorsqu'elle

décrit et illustre les expériences de son mari en son absence –, mais aussi de manière active, lorsqu'elle s'investit personnellement dans la discussion avec des adversaires scientifiques. Elle s'intéresse alors « *souvent bien plus que Lavoisier à certains contradicteurs, en favorisant leur "conversion" à de nouvelles idées* », une dynamique qui devient particulièrement visible dans le cas de Marsilio Landriani [14b].

Landriani s'était fait connaître dès 1775 par la publication d'un ouvrage consacré à la salubrité de l'air, ainsi que par la mise au point d'un instrument de laboratoire majeur, l'eudiomètre, qu'améliorera par la suite Alessandro Volta, avec lequel il partage en Italie un niveau de notoriété comparable. Physicien et chimiste, professeur de physique expérimentale à Brera, Landriani oscille durablement entre l'adhésion à la théorie de l'oxygène – dont il tente de développer une conception de l'acidité – et l'attachement à la doctrine du phlogistique.

En 1788, une série d'expériences démonstratives est organisée à l'Arsenal dans le but explicite de provoquer la « conversion » du chevalier. Marie-Anne y est présente, comme l'atteste son écriture dans les registres à la date du 20 mars, dans une tentative de le faire renoncer à « l'ancienne doctrine »⁽⁸⁾. Après cet échec, en avril 1788, Jean-Baptiste Meusnier de la Place (1754-1793) [12b], alors en poste à Cherbourg, écrit à Madame Lavoisier pour lui rendre compte de ses propres échanges avec Landriani, qui l'a rejoint et à qui il a exposé à son tour les principes de la nouvelle chimie [14c]. L'épisode révèle ainsi la continuité d'une entreprise collective de persuasion, dans laquelle Marie-Anne occupe une place centrale.

L'étude de sa correspondance constitue un autre observatoire privilégié de ces stratégies à l'œuvre. Marie-Anne dispose en effet de son propre réseau d'interlocuteurs, indépendant ou parallèle à celui de son mari. Celui-ci comprend des membres du groupe de l'Arsenal – Meusnier, Hassenfratz, Guyton de Morveau –, mais aussi des savants étrangers tels que Landriani, Horace-Bénédict de Saussure (1740-1799), Marc-Auguste Pictet (1752-1825) ou encore Benjamin Franklin (1706-1790) (voir figure 1).

Lors de la préparation de la « Grande Expérience » de la décomposition et recombinaison de l'eau, menée du 28 février au 1^{er} mars 1785, Lavoisier adresse de nombreuses invitations aux savants et aux représentants du pouvoir. Marie-Anne joue

un rôle actif dans cette organisation, notamment en prenant elle-même contact avec le duc de Malesherbes, qu'elle invite par ses propres lettres : « Elle a chargé M. du Séjour de négocier cet arrangement avec vous », écrit ainsi Lavoisier [17b].

Les échanges épistolaires avec Saussure montrent enfin l'efficacité de ces stratégies. Le savant genevois, encore phlogisticien, lui écrit en mars 1788 : « Mais vous n'avez point besoin de me dire que vous ne prétendez point exercer un empire absolu sur les opinions. Landriani lui-même ; que vous aviez si bien reçu malgré son invincible opiniâtreté, est une preuve de votre tolérance. Sans doute, votre réponse et celle de M. Lavoisier ne tiennent point à ces questions : il pensera s'être trompé sur la nature du phlogistique et aura lassé un des plus grands physiciens de ce siècle » [14d].

L'Essay sur le phlogistique, Les Annales de Chimie et le Traité de Lavoisier

Après le succès de la *Méthode de nomenclature chimique* publiée en 1787 par Guyton de Morveau, Lavoisier, Berthollet et Fourcroy, avec la collaboration d'Adet et de Hassenfratz, le groupe de l' Arsenal entreprend la traduction de l'ouvrage de Richard Kirwan (1733-1812) *Essay sur le phlogistique, et sur la constitution des acides*. Celui-ci remet en cause les travaux lavoisiens en les réinterprétant à la lumière de la doctrine phlogistique, qu'il présente comme équivalente à la nouvelle chimie. Il s'agit dès lors, pour le groupe, de répondre à cette attaque en retournant l'argumentaire adverse contre lui-même. Lavoisier organise à cette fin un nouveau travail collectif, associant Berthollet, Fourcroy, Guyton de Morveau, Monge, Laplace et Marie-Anne Paulze-Lavoisier. La part la plus conséquente du travail revient à cette dernière. C'est à elle qu'incombe la traduction du texte anglais, avec un soin extrême apporté à la justesse des termes et à la fidélité conceptuelle, voire au-delà, comme le suggère l'analyse minutieuse des notes de traduction menée par Keiko Kawashima [18]. Aux chimistes revient ensuite la tâche de répondre, sous une forme étendue de notes de bas de page, à chaque passage où Kirwan invoque leurs expériences ou leurs résultats, afin d'en préciser le sens ou d'en réfuter les conclusions. Dès septembre 1787, Landriani et Jean Senebier (1742-1809), tous deux alors critiques de Lavoisier, évoquent dans leur correspondance la traduction en cours, s'inquiétant du succès possible de l'ouvrage à paraître. La traduction complète est achevée en septembre 1788 et contribue effectivement à rallier de nouveaux suffrages, parmi lesquels celui de Horace-Bénédict de Saussure, qui écrit à Madame Lavoisier qu'elle a dissipé ses doutes [14e].

L'anonymat du traducteur – qui s'exprime pourtant dès la préface – ainsi que la question de la légitimité scientifique de Marie-Anne Paulze, jugée problématique en tant que femme, ont été discutés par les historiens au regard des usages sociaux de l'époque [16b].

L'hypothèse d'une anonymisation imposée par Lavoisier ou par ses pairs, reléguant Marie-Anne au rang de simple secrétaire, a toutefois été remise en cause. Les écrits conservés suggèrent bien plutôt une appropriation consciente et stratégique de cette campagne en faveur de la nouvelle chimie par Marie-Anne elle-même [19]. Son anonymat ne constitue alors qu'une façade, destinée à ne pas affaiblir la portée polémique du texte. De fait, de nombreux savants français et étrangers savent, par son intermédiaire ou par des tiers, qu'elle en est l'auteure – et une auteure reconnue [20].

Cette stratégie d'effacement contrôlé se retrouve lors de la fondation des *Annales de chimie*, revue scientifique créée en 1789 à l'initiative de Berthollet et sous le patronage de Lavoisier. Marie-Anne Paulze fait partie des traductrices des textes anglais, aux côtés notamment de Claudine Picardet (1735-1820), tandis que Jean-Henri Hassenfratz (1755-1827) et Frédéric-Philippe de Dietrich (1748-1793) assurent la traduction des articles allemands [21]. Elle est également chargée de la recension des nouveaux ouvrages étrangers [1b].

Sa participation au *Traité élémentaire de chimie* s'inscrit dans une posture comparable, à la fois essentielle et partiellement voilée. L'ouvrage est conçu pour être accompagné de nombreuses planches représentant les appareils expérimentaux. Marie-Anne propose une répartition précise du travail : Hassenfratz se charge des dessins préparatoires, tandis qu'elle-même assure la gravure. En août 1788, Hassenfratz rend compte de l'état d'avancement de ses dessins, soulignant les difficultés techniques liées à l'inversion des ombres, qu'il juge surmontables pour « Madame de Lavoisier », dont il loue explicitement l'intelligence et la compétence [14f].

Dans cette œuvre que Lavoisier revendique une nouvelle fois comme collective⁽⁹⁾, si le nom de Marie-Anne n'apparaît pas dans le texte, celle-ci n'omet pas de signer les planches gravées de son nom par la mention explicite « Paulze Lavoisier Sculpit » (voir figure 2). Ce geste discret mais public marque à la fois sa contribution effective et sa maîtrise d'un espace d'autorité scientifique fondé sur la matérialité des savoirs.

Les Mémoires de chimie

Le succès du *Traité élémentaire de chimie* et la diffusion des idées du groupe de l' Arsenal par les *Annales de chimie* favorisent l'adhésion progressive d'un nombre croissant de chimistes à la nouvelle doctrine. L'apprentissage de la chimie se fait désormais largement à partir du *Traité*, conçu comme un ouvrage de référence destiné aux nouveaux praticiens. Dans ce contexte, Antoine-Laurent Lavoisier envisage une réorganisation de son œuvre scientifique, et notamment de ses *Mémoires de chimie*, afin d'en proposer une mise en ordre cohérente et accessible.

Ce projet est brutalement interrompu par la Révolution. Arrêté en novembre 1793, Lavoisier ne peut mener à bien cette entreprise et est exécuté le 8 mai 1794. Madame Lavoisier, en tant que femme et membre d'une famille de fermiers généraux – son père, son frère et son mari – est à son tour

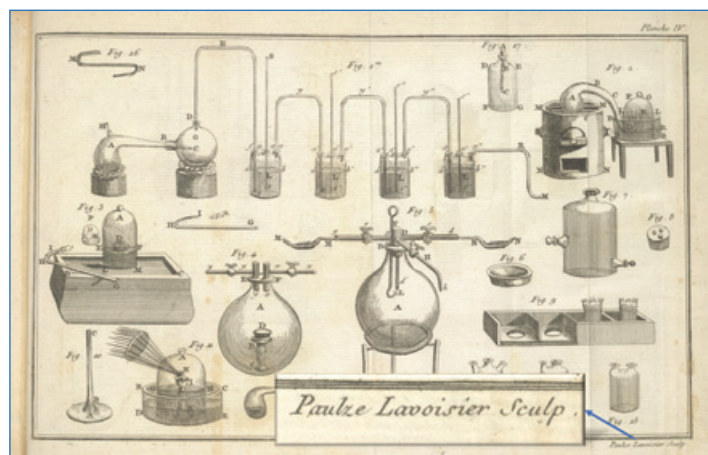


Figure 2 - *Traité Élémentaire de Chimie*, Planche IV, 1789.

dépossédée de l'ensemble de ses biens, arrêtée, incarcérée, puis finalement relâchée. Vivant un temps dans l'anonymat, elle traverse une période de grande précarité matérielle et sociale.

La chute de Robespierre et la fin de la Convention permettent cependant la révision du procès des fermiers généraux et la mise au jour des accusations infondées – concussion et empoisonnement du tabac – qui avaient conduit à leur condamnation. Marie-Anne Paulze recouvre alors une partie importante de ses biens. De retour à Paris, elle se consacre à l'achèvement de l'œuvre scientifique de son mari, reprenant le projet éditorial que celui-ci n'avait pu mener à terme.

Elle parvient ainsi, non sans difficultés et à ses propres frais, à faire paraître, vers 1801-1802, deux recueils des *Mémoires de chimie*. Cette entreprise constitue l'aboutissement de son travail d'éditrice scientifique : sélection des textes, mise en ordre, normalisation et publication d'un corpus destiné à fixer durablement l'héritage lavoisien. Si cette étape marque la fin de son engagement direct dans l'édition scientifique, elle ne renonce toutefois pas à sa mission mémorielle, qu'elle poursuivra sous d'autres formes tout au long de sa vie.

L'analyse des sources récentes relatives aux activités de Marie-Anne Paulze permet de préciser son statut et ses stratégies d'action au sein du groupe de l'Arsenal dans le contexte de la diffusion de la nouvelle chimie. Considérée tant par les adhérents que par les opposants comme un membre à part entière de cette communauté savante, son travail, reconnu dès son époque, s'inscrit néanmoins dans une logique d'invisibilisation volontaire. Celle-ci répond à une stratégie délibérée visant à maximiser l'efficacité de la diffusion doctrinale tout en limitant les résistances liées au genre et au statut social.

Cette posture, aujourd'hui mieux documentée et reconnue par l'historiographie, permet de replacer Marie-Anne Paulze à sa juste place : non comme une figure marginale ou simplement auxiliaire, mais comme une actrice centrale des processus de circulation et de stabilisation des savoirs chimiques à la fin du XVIII^e siècle.

Épilogue, la comtesse de Rumford, gardienne mémorielle

En 1804, Marie-Anne Paulze acquiert un hôtel particulier rue d'Anjou-Saint-Honoré. Dans cette vaste demeure, elle veille à disposer, dans plusieurs pièces, les instruments scientifiques et les livres ayant appartenu à Lavoisier, notamment au sein d'une enfilade où « le cabinet de physique de Lavoisier était considéré comme approprié pour une visite sociale qui, selon toutes les évidences, n'était pas directement liée à la science ou aux expériences. Étant donnée la taille de la résidence de Marie-Anne Lavoisier, cela était certainement délibéré. La collection d'instruments créait une ambiance évoquant le génie de Lavoisier tout en démontrant le savoir-faire de son conservateur présent » [10a].

Le laboratoire restauré, les collections exposées, les registres conservés, Madame Lavoisier peut de nouveau faire salon – et faire salon scientifique. Elle y reçoit les anciens membres du groupe de l'Arsenal, tels Laplace ou Berthollet, ainsi que de jeunes savants promis à un avenir scientifique éminent, parmi lesquels Gay-Lussac, Biot et Arago. Son rôle de gardienne de la mémoire de son mari devient alors indissociable de sa propre identité sociale et intellectuelle.



Figure 3 - *Portrait d'Antoine Lavoisier et de sa femme*, par Jacques-Louis David, 1788 (Metropolitan Museum of Art, New York). Le tableau, commandé par Marie-Anne, peut se lire comme le mélange programmatique des arts et des sciences et leur répartition au sein du couple au service de la nouvelle chimie.

Courtisée par le comte Benjamin Thompson de Rumford (1753-1814), auquel elle ouvre l'accès au laboratoire de Lavoisier installé dans sa demeure – où il poursuit ses propres travaux sur la calorimétrie –, Marie-Anne Paulze finit par l'épouser. Elle ne peut cependant renoncer au nom de Lavoisier, ni à la mission mémorielle qu'elle s'est assignée. Elle prolonge d'ailleurs cette entreprise par la mise en scène du laboratoire de son premier mari dans sa demeure : les objets de Lavoisier, « rendus visibles aux invités, [...] deviennent le moyen d'une opération de construction de la mémoire de Lavoisier » [13b].

Dans ce dispositif, le tableau qu'elle a fait réaliser par David en 1788 (figure 3), placé à un endroit stratégique, semble jouer un rôle central. La composition même de la scène rappelle une assignation différenciée des rôles : le matériel scientifique est disposé sur la table et au sol, au pied de Lavoisier, tandis que les cartons et planches à dessin apparaissent du côté de Marie-Anne. L'image donne ainsi à voir un partage à la fois des fonctions et des champs de maîtrise – expérimentation et conceptualisation d'un côté, médiation, écriture et représentation de l'autre.

Cette répartition n'implique ni effacement ni subordination. Marie-Anne semble pleinement consciente de ne pouvoir – et de ne vouloir – rivaliser avec son mari sur le terrain même où il s'illustre. David lui-même paraît intégrer cette dynamique : en la représentant en position de soutien, mais aussi de surplomb, Marie-Anne apparaît à la fois comme collaboratrice, garante et figure tutélaire de l'œuvre en train de se faire.

Le tableau fonctionne ainsi comme une image programmatique de la division du travail scientifique au sein du couple.

Le matériel est mobilisé, les registres prêtés, les savoirs activés [10b] : il s'agit, encore et toujours, de faire vivre Lavoisier à travers les traces matérielles, intellectuelles et visuelles de son œuvre.

Marie-Anne divorce en 1809. Progressivement, le salon perd son caractère scientifique. Elle s'éteint en 1836, léguant son héritage à sa petite-nièce, fille d'un fils survivant de son frère. Son mari, le comte de Chazelles, se montre néanmoins déterminé à faire perdurer l'héritage lavoisien : c'est lui qui prend contact avec Jean-Baptiste Dumas (1800-1884) après sa célèbre oraison prononcée au Collège de France. L'édition de l'œuvre débute à partir de 1862. Dumas meurt avant son achèvement ; Édouard Grimaux (1835-1900) lui succède, avant de disparaître à son tour en 1900, laissant encore inédites les lettres de Lavoisier.

La publication de cette correspondance reprend en 1954 grâce à René Fric (1880-1970). Parallèlement, les historiens s'intéressent de manière croissante tant à l'œuvre qu'aux instruments. Douglas McKie (1896-1957), travaillant pour le descendant Dupont, est chargé de collecter l'héritage scientifique, dont une partie est conservée par les descendants, l'autre étant déposée au Conservatoire national des arts et métiers [10c]. Après 1980, René Taton impulse une nouvelle orientation à ce qu'il convient d'appeler le Comité Lavoisier [17c]. Il organise l'entreprise d'édition et de mise en forme de la correspondance, successivement dirigée par Michelle Goupil puis Patrice Bret. En 1997, sept tomes ont été publiés [2c].

Restauré en 2021 en association avec la Société française d'histoire de la chimie, le Comité Lavoisier poursuit aujourd'hui encore sa mission. De nouvelles lettres de Lavoisier ont été mises au jour en 2025 ; les deux derniers tomes de la *Correspondance* sont désormais en attente de parution.

Il y a plus de deux siècles que Marie-Anne Paulze s'est attachée, avec constance et détermination, à promouvoir la mémoire et l'œuvre scientifique de son mari. L'entreprise mémorielle qu'elle initie – prolongée par sa descendance, des historiens et des passionnés – demeure ainsi toujours active. En ce sens, son action constitue, au-delà de l'hommage conjugal, une véritable œuvre historique, inscrite dans la durée et indissociable de la construction même de la figure de Lavoisier.

Notes et références

(1) Sur leurs travaux, voir notamment : D. Duveen, *Madame Lavoisier (1758-1836)*, *Chymia*, **1953**, 4, p. 13-29, <https://doi.org/10.2307/27757161> ; K. Kawashima, *Madame Lavoisier. The Participation of a Salonnière in the Chemical Revolution, Lavoisier in Perspective*, M. Beretta (ed.), *Deutsches Museum*, **2005**, p. 79-94 ; R. Hoffmann, *More about Mme. Lavoisier than M. Lavoisier*, *Contributions to Science*, **2008**, 4(1), p. 111-113 ; R. Cypess, *Madame Lavoisier's music collection: lessons from a private library of the nineteenth century*, *Notes*, **77**(2), **2020**, p. 224-252 ; F. Antonelli, *Madame Lavoisier and the others: women in Marie-Anne Paulze-Lavoisier's network (1771-1836)*, *Notes Rec. R. Soc. Lond.*, **2022**, 77(2), p. 283-302, <https://doi.org/10.1098/rsnr.2021.0074>

(2) Sur le plan des normes sociales, le mariage de Marie-Anne Paulze avec Antoine-Laurent Lavoisier, contracté en 1771 alors qu'elle n'a que treize ans, doit être replacé dans le cadre des pratiques matrimoniales de la haute société française de la fin de l'Ancien Régime. Si un tel âge apparaît aujourd'hui particulièrement précoce, il n'est pas sans précédents dans les milieux privilégiés, où le mariage peut fonctionner avant tout comme un instrument d'alliance familiale, de sécurisation patrimoniale et de protection sociale (ce qui est ici le cas pour Marie-Anne qui cherche à échapper à un mariage « dangereux »). Pour citer quelques exemples célèbres, rappelons que Marie-Antoinette se marie à quatorze ans, Adélaïde de Bourbon et Joséphine de Beauharnais à seize ans.

(3) En 1773, Balthazar Georges Sage (1740-1824), chimiste, minéralogiste, professeur et membre de l'Académie des sciences, le définit ainsi : « On donne le nom de chaux, ou de terres métalliques, aux métaux auxquels on a enlevé la forme métallique par la calcination. Dans cette opération, les métaux perdent leur couleur, leur pesanteur spécifique et augmentent en pesanteur absolue ; l'acide qui se développe du feu, se combine avec leur phlogistique, s'unit à leur terre et produit des sels

phosphoriques métalliques » (B.-G. Sage, *Mémoires de chimie*, par M. Sage, Imp. roy., Paris, **1773**, p. 65-66). Fervent partisan du phlogistique, il sera un opposant farouche et jamais convaincu par les idées nouvelles de Lavoisier (D. Todericiu, Balthasar-Georges Sage (1740-1824), chimiste et minéralogiste français, fondateur de la première École des Mines (1783), *Rev. Hist. Sc.*, **1984**, 37-1, p. 29-46).

(4) Ce principe a été formulé plus tard par Lavoisier notamment dans le *Traité Élémentaire de chimie* : « car rien ne se crée, ni dans les opérations de l'art, ni dans celles de la nature, et l'on peut poser en principe que, dans toute opération, il y a une égale quantité de matière avant et après l'opération ; que la qualité et la quantité des principes est la même, et qu'il n'y a que des changements, des modifications » [8a].

(5) L'intuition de Lavoisier date de 1772 : « Il y a environ huit jours que j'ai découvert que le soufre en brûlant loin de son poids en acquiert au contraire. Cette découverte que je regarde comme décisive m'a fait penser que ce qui s'observait dans la combustion du soufre pourrait bien avoir lieu à l'égard de tous les corps qui acquièrent du poids par la combustion... » (R. Fric, *Œuvres de Lavoisier, Correspondance, fasc. II*, Hermann, **1957**, p. 389-390). Elle se renforce progressivement tout au long des années 1770, ce qui transparaît dans de nombreux mémoires présentés à l'Académie des sciences, dont le *Mémoire sur la combustion en général* [5c] et celui sur les *Considérations générales sur la nature des acides et sur les principes dont ils sont composés* qui signe l'acte de naissance du principe oxygène [5d] (voir note 6).

(6) « D'après ces vérités que je regarde déjà comme très solidement établies, je désignerai dorénavant l'air déphlogistique [...] par le nom de principe acidifiant ou [...] principe oxygène » [5d].

(7) Un portrait inconnu de madame Lavoisier ? *Bulletin des bibliothèques de France*, <https://bbf.enssib.fr/contributions/un-portrait-inconnu-de-madame-lavoisier>, consulté le 24 janvier 2026.

(8) Durant l'année 1788, Lavoisier et ses collègues tentent de convaincre le chevalier de la justesse de leur système. De manière très brève, les expériences réalisées autour du 20 mars 1788 pour le convertir sont évoquées au début du cahier de laboratoire n°13 de Lavoisier [3b]. Marie-Anne, qui est en fait la véritable consignatrice des expériences [9b], indique d'ailleurs la liste des protagonistes : Hassenfratz, Welter, Lavoisier et Landriani.

(9) « L'habitude de vivre ensemble, de nous communiquer nos idées, nos observations, notre manière de voir, a établi entre nous une sorte de communauté d'opinions, dans laquelle il nous est souvent difficile à nous-mêmes de distinguer ce qui nous appartient plus particulièrement » [8b].

[1] J.-P. Poirier, *La science et l'amour*, *Pygmalion*, **2003**, a) p. 13 ; b) p. 129.

[2] E. Jacques, *Lavoisier*, *Ellipses*, **2019**, a) p. 253-293 ; b) p. 388-91 ; c) p. 392.

[3] M. Berthelot, *Lavoisier : La Révolution chimique*, Felix Alcan, Paris, **1890**, a) p. 209-310 ; b) p. 306-308.

[4] E. Grimaux, *Lavoisier*, J. Gabay, **1896**, a) p. 36 ; b) p. 38-40.

[5] J.-B. Dumas (ed.), *Œuvres de Lavoisier, t. II*, Imp. imp., Paris, **1862**, a) p. 1-29 ; b) p. 122-128 ; c) p. 225-233 ; d) p. 248-260.

[6] E. Jacques, *L'Arsenal de Lavoisier : un centre technique et scientifique de recherche (1776-1792)*, *fasc. I*, Amazon Independently published, **2023**, a) p. 80-83 ; b) p. 74-76 ; c) p. 64-69 ; d) p. 122-123.

[7] E. Jacques, *Lavoisier, ses expériences et son laboratoire*, *L'Act. Chim.*, **2024**, 498, p. 5-10, a) p. 5-6 ; b) p. 6-7.

[8] J.-B. Dumas (ed.), *Œuvres de Lavoisier, vol. I*, Imp. imp., Paris, **1864**, a) p. 101 ; b) p. 138.

[9] F. Antonelli, *Scrivere e sperimentare, Marie-Anne Paulze-Lavoisier, segretaria della "nuova chimica" (1771-1836)*, *Viella*, **2022**, a) p. 114 ; b) p. 181.

[10] M. Beretta, P. Brenni, *The Arsenal of Eighteenth-Century Chemistry*, Brill, Leiden, **2022**, a) p. 95 ; b) p. 98 ; c) p. 111-113.

[11] R. Hahn, *Lavoisier et ses collaborateurs : une équipe au travail*, in *Il y a 200 ans Lavoisier*, C. Demeulenaere-Douyère (ed.), Tec & Doc, Lavoisier, **1995**, p. 55-63.

[12] E. Jacques, *Jean-Antoine Chaptal (1756-1832) : premier chimiste disciple de Lavoisier*, *CR. Chim.*, **2024**, 27, p. 19-45, a) p. 33-34 ; b) p. 36-37.

[13] F. Antonelli, *Scrittura, sociabilità e strategie di persuasione : Marie-Anne Paulze-Lavoisier, segretaria (1758-2836)*, thèse de doctorat, Université de Bologne en cotutelle avec l'école des Hautes Études en Sciences Sociales, **2021**, a) p. 88 ; b) p. 216.

[14] M. Goupil (dir.), *Œuvres de Lavoisier, Correspondance, vol. V*, Hermann, **1993**, a) p. 269-275 ; b) p. 141n ; c) p. 157-158 ; d) p. 151-152 ; e) p. 232 ; f) p. 199-200.

[15] C. Viel, *Le salon et le laboratoire de Lavoisier à l'Arsenal, cénacle où s'élabore la nouvelle chimie*, *Rev. Hist. Pharm.*, **1995**, 306, p. 255-266.

[16] K. Kawashima, *Émilie du Châtelet et Marie-Anne Lavoisier*, *Honoré Champion*, **2013**, a) p. 216-217 ; b) p. 199-206.

[17] M. Goupil (dir.), *Œuvres de Lavoisier, Correspondance, vol. IV*, Hermann, **1986**, a) p. 182n ; b) p. 70 ; c) p. VII-IX.

[18] K. Kawashima, *Madame Lavoisier et la traduction française de l'Essay on phlogiston de Kirwan*, *Rev. Hist. Sc.*, **2000**, 53-2, p. 235-264.

[19] F. Antonelli, *Becoming visible. Marie-Anne Paulze-Lavoisier and the campaign for the "New Chemistry" (1770s-1790s)*, *Ambix*, **2022**, 69-3, p. 221-242.

[20] F. Antonelli, *Héros... et héroïnes ? Marie-Anne Paulze-Lavoisier et les multiples ressorts de l'invisibilité*, *Communications*, **2023**, 2(113), p. 45-55.

[21] P. Bret (ed.), *Œuvres de Lavoisier, Correspondance, vol. VI*, Hermann, Paris, **1997**, p. 415-426.

Éric JACQUES*, président du groupe Histoire de la chimie de la Société Chimique de France, est professeur de chimie en BTS au lycée Louis-Vincent, Metz, doctorant en histoire des sciences, Archives Henri Poincaré, Nancy, membre du Comité Lavoisier.

* eric.jacques@ac-nancy-metz.fr



Aline Auroux, une chimiste engagée dans l'innovation et la transmission du savoir

Lors du décret du 11 juillet 2025, Aline Auroux a été nommée au grade de Chevalier dans l'Ordre de la Légion d'Honneur. Cette pionnière dans le domaine de la catalyse, de l'environnement et des énergies nouvelles, est également très impliquée dans la Société Chimique de France depuis de nombreuses années. Une belle occasion de mettre en avant son parcours.

Par ses travaux de recherche de haute qualité, ses relations industrielles et universitaires en France et à l'étranger, par son engagement au niveau de la formation des jeunes, en particulier des jeunes filles, et par son rôle dans l'animation scientifique, Aline Auroux a eu une action importante au niveau du rayonnement scientifique de la France et de la motivation scientifique des jeunes filles.

À côté de sa carrière, elle a soutenu à son domicile son mari atteint de la maladie de Charcot pendant dix années.

Une carrière scientifique internationale brillante

Directrice de recherche émérite au CNRS, Aline Auroux a mené des recherches de haut niveau dans le domaine de la catalyse et en tant qu'animatrice du groupe « Énergies propres et renouvelables » (2006-2013) au sein de l'Institut de recherches sur la catalyse et l'environnement de Lyon (IRCELYON). Depuis 2006, elle y a initié avec succès de nombreux projets sur le stockage et la production d'hydrogène, la production de biocarburants, le stockage thermo-chimique inter-saisonnier de la chaleur pour l'habitat par des matériaux composites, et plus récemment sur la capture du CO₂ et sa transformation.

Ses travaux dans le domaine des énergies propres et renouvelables lui ont permis d'obtenir vingt-six contrats de recherche, de collaborer avec des sociétés privées (Areva, Snecma, Eastman, Solvay, Arkema, Baikowski...) et de nombreux laboratoires français et étrangers (Allemagne, Azerbaïdjan, Belgique, Bosnie, Canada, Chine, Espagne, États-Unis, Finlande, Hongrie, Italie, Roumanie, Serbie). Elle a d'autre part obtenu de nombreuses ANR et participé à trois projets européens (dont EuroBioRef et PyroCO₂) et a reçu le Prix Illie Murgulescu de l'Académie roumaine des sciences en 2003, le Prix Édouard Calvet de l'Association française de calorimétrie et d'analyse thermique (AFCAT) en 2007 et le Prix scientifique du Groupe Paris-Lyon en 2015.

Les travaux de recherche d'Aline Auroux ont fait l'objet de près de 380 articles dans des journaux internationaux à comité de lecture, donnant lieu à quelque 15 000 citations. Elle a rédigé dix-sept chapitres de livres et a édité deux livres dédiés aux méthodes calorimétriques appliquées à la catalyse (*Calorimetry and Thermal Methods in Catalysis* chez Springer en 2013, et *Thermal Analysis and Calorimetry. Versatile Techniques*,



Remise des insignes de Chevalier à Aline Auroux par Nicole Jaffrezic-Renault lors de la cérémonie du 17 décembre à l'amphithéâtre de la Délégation régionale du CNRS de Villeurbanne.

avec L. Damjanović-Vasilic chez De Gruyter en 2023). Elle a donné 66 conférences invitées dans le monde entier ainsi que dans de nombreuses industries. Elle a également organisé trois congrès internationaux (CTEC2000, CTEC2004, CTEC2012), édité les ouvrages correspondants (*Thermochim. Acta*, vol. 379 (2001), 434 (2005), 567 (2013)), et organisé treize écoles internationales de calorimétrie qui ont rassemblé plus de 80 participants chaque année (2012 à 2024).

Un rôle de transmission auprès des jeunes chercheurs et chercheuses

Forte de son expérience, Aline Auroux a transmis son savoir-faire et ses connaissances à de plus de 120 jeunes chercheurs, en privilégiant l'accueil et la formation de jeunes femmes peu nombreuses dans ce domaine. Ses deux jeunes collaboratrices permanentes ont été des femmes dont elle a soutenu la carrière ; l'une a obtenu une Médaille de bronze du CNRS et l'autre une chaire d'excellence. Elle a notamment dirigé vingt thèses de doctorat (neuf étudiants, onze étudiantes).

Un engagement pour la communauté des chimistes

Aline Auroux s'est investie dans des tâches d'intérêt collectif en s'impliquant fortement dans l'animation de la Société Chimique de France (SCF). Elle y a été membre du Comité d'organisation de la Journée Printemps SCF Rhône-Alpes (2015), trésorière de la section Rhône-Alpes (2013-2020), trésorière de la division transversale Énergie (2015-2021), membre élu du Conseil d'administration (2015-2021), vice-présidente (2015-2018) et secrétaire générale (2018-2021). Depuis 2024, elle a repris ses fonctions de trésorière de la section Rhône-Alpes et de la division transversale Énergie, ainsi que de membre élu du Conseil d'administration ; elle est également chargée de mission de l'actuel bureau.

Elle a par ailleurs été présidente de la division Chemistry and Energy de EuCheMS (2018-2025) et est membre du Conseil d'administration du Collège des Sociétés savantes académiques de France depuis janvier 2025.

Cet article est basé sur le discours de Nicole JAFFREZIC-RENAULT, directrice de recherche émérite à l'Université Marie et Louis Pasteur (Besançon), préparé pour la cérémonie de remise de la Légion d'Honneur au cours de laquelle elle a remis ses insignes à Aline AUROUX (aline.auroux@outlook.com).



La piste moléculaire pour le stockage et la conversion d'énergie solaire

Léa CHOCRON

Résumé Face aux défis énergétiques et climatiques actuels, le développement de technologies capables de stocker et de restituer efficacement l'énergie solaire constitue un enjeu majeur. Cet article présente un système de stockage solaire thermique moléculaire (MOST) reposant sur des molécules photoisomérisables capables de capter l'énergie du rayonnement solaire et de la restituer sous forme de chaleur à la demande. Le système étudié est basé sur des molécules de la famille des diaryléthènes, conçues pour stocker l'énergie sous forme chimique après irradiation lumineuse. La libération de l'énergie est déclenchée par l'ajout catalytique d'un acide, permettant d'induire la réaction thermique inverse et de contrôler la restitution de la chaleur. Cette approche combine ainsi un stockage d'énergie sur de longues durées avec un déclenchement efficace et modulable de la libération thermique. Les résultats obtenus mettent en évidence le fort potentiel de ces composés pour des applications de stockage d'énergie solaire et ouvrent des perspectives pour le développement de systèmes MOST durables, recyclables et compatibles avec les exigences des technologies énergétiques bas carbone.

Mots-clés Stockage d'énergie solaire, photochromisme, diaryléthènes.

Abstract A molecular pathway for solar energy storage and conversion

In the context of current energy and climate challenges, the development of technologies capable of efficiently storing and releasing solar energy has become a major priority. This article presents a molecular solar thermal (MOST) energy storage system based on photoisomerisable molecules able to capture solar energy and release it as heat on demand. The system relies on diarylethene derivatives designed to store solar energy in the form of chemical potential upon light irradiation. The release of the stored energy is triggered by the catalytic addition of an acid, which induces the thermal back reaction and enables controlled heat generation. This approach combines long-term energy storage with efficient and tunable heat release. The results highlight the strong potential of these compounds for solar energy storage applications and open new perspectives for the development of sustainable, recyclable and carbon-neutral MOST technologies.

Keywords Solar energy storage, photochromism, diarylethenes.

<https://doi.org/10.63133/scf.act-chim.2026.512.03>

L'enjeu du stockage de l'énergie solaire

Face aux défis majeurs de la transition énergétique, l'énergie solaire s'impose comme la source d'énergie la plus abondante et l'une des plus propres de la planète. Déjà largement exploitée à l'échelle mondiale, notamment à travers les installations photovoltaïques, elle représente en 2024 près de 10 % de la production mondiale d'électricité, avec une croissance particulièrement marquée en Chine et aux États-Unis. En parallèle, d'autres technologies tirant parti du rayonnement solaire, en particulier pour ses propriétés thermiques, se développent rapidement, notamment pour la production d'eau chaude.

Mais ce potentiel reste encore largement sous-exploité. En cause : la nature intermittente du rayonnement solaire, soumise aux cycles jour/nuit et aux variations saisonnières. Qu'il s'agisse de produire de l'électricité ou de la chaleur, le solaire ne peut fonctionner de manière continue sans être couplé à une autre source d'énergie. Son déploiement à grande échelle dépend donc du développement de technologies de stockage, de conversion et de restitution à la fois fiables, abordables et facilement industrialisables.

Plusieurs stratégies ont ainsi vu le jour pour stocker l'énergie solaire, allant des solutions électrochimiques comme les batteries, aux approches thermodynamiques reposant sur des

matériaux à changement de phase. Parmi elles, les voies de stockage chimique apparaissent particulièrement prometteuses. L'une des plus emblématiques est celle des « carburants solaires », qui consistent à utiliser le rayonnement solaire pour déclencher des réactions chimiques produisant des molécules riches en énergie, telles que le dihydrogène ou le méthane [1]. L'énergie y est stockée sous forme chimique, puis libérée par combustion ou *via* des systèmes électrochimiques.

Les molécules photochromes relèvent le défi

Dans ce paysage en pleine mutation, une approche alternative et innovante a émergé : le stockage solaire thermique moléculaire, ou MOST (« *Molecular Solar Thermal Energy Storage* »). Ce concept repose sur l'utilisation de molécules photoisomérisables, appelées photochromes, dont le principe est schématisé en *figure 1* [2]. Sous l'effet de la lumière, celles-ci passent de manière réversible d'un isomère stable et peu énergétique (A) à un isomère métastable plus énergétique (B). L'énergie solaire est alors piégée sous forme de potentiel chimique, puis restituée à la demande grâce à un stimulus externe (lumière d'une autre longueur d'onde, courant électrique ou catalyseur) qui déclenche la réaction inverse $B \rightarrow A$ et libère la chaleur stockée.

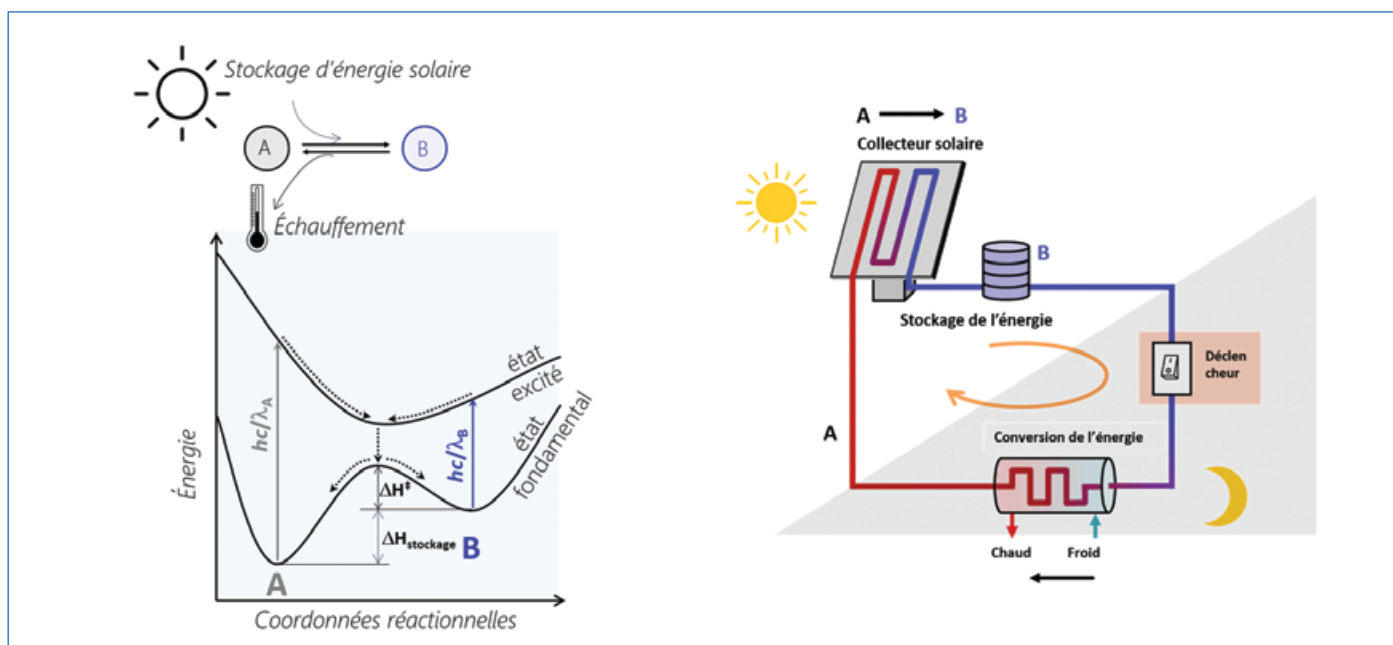


Figure 1 - À gauche : principe du stockage d'énergie solaire avec des molécules photochromes ; à droite : dispositif pratique de stockage et conversion d'énergie solaire avec des molécules photochromes.

Les systèmes MOST présentent des avantages majeurs par rapport aux technologies solaires plus conventionnelles. Contrairement au photovoltaïque, qui produit de l'électricité, une forme d'énergie souvent complexe et coûteuse à stocker, ils stockent directement l'énergie solaire au cœur même de la structure chimique des molécules, sans étape intermédiaire de conversion. Cette énergie est ensuite restituée sous forme de chaleur, directement exploitable pour des applications de chauffage. De plus, à la différence des carburants solaires, qui reposent sur le stockage de gaz, la combustion et des transformations chimiques irréversibles, les systèmes MOST utilisent des molécules en solution, faciles à manipuler et capables d'enchaîner des centaines de cycles charge/décharge sans dégradation notable.

Une mise en œuvre concrète de ce concept repose sur un système fluide, tel que celui présenté en figure 1. Dans ce dispositif, un fluide contenant la molécule photochrome circule d'abord dans un collecteur solaire, où l'irradiation déclenche la photoconversion $A \rightarrow B$. L'énergie lumineuse incidente est alors stockée sous forme chimique dans le composé B, qui peut ensuite être conservé dans un réservoir dédié, idéalement sur de longues durées. Lorsque l'énergie doit être restituée, la réaction inverse $B \rightarrow A$ est déclenchée dans un réacteur de chauffage, entraînant la libération de chaleur. Une fois la réaction achevée, le composé A est régénéré et le fluide peut être réinjecté dans le circuit pour un nouveau cycle de stockage et de conversion de l'énergie. Pour être réellement performants, ces systèmes doivent toutefois répondre à plusieurs critères clés [3] : une grande différence d'énergie entre les deux isomères, une excellente stabilité à long terme de la forme métastable, une forte réversibilité et un déclenchement fiable et contrôlé de la réaction inverse. Bien que les bases du concept aient été posées dès le début du xx^e siècle et formalisées en 1979 [4], les avancées significatives vers des applications concrètes ne datent que des années 2010. Parmi les familles de photochromes étudiées, le couple norbornadiène/quadricyclane (NBD/QC) s'est distingué par une densité de stockage élevée – jusqu'à $1 \text{ MJ}\cdot\text{kg}^{-1}$ – et une synthèse relativement simple [5].

Malgré ces progrès, plusieurs verrous technologiques subsistent. L'un des principaux concerne le développement d'agents de déclenchement efficaces, accessibles et respectueux de l'environnement pour libérer l'énergie stockée à la demande. Les stratégies actuelles reposent souvent sur des catalyseurs métalliques ou des activations électrochimiques, faisant appel à des matériaux coûteux, rares ou potentiellement polluants, ce qui pose des problèmes de durabilité et de passage à l'échelle [6].

Une découverte collaborative

C'est dans ce contexte que s'inscrit le travail collaboratif de plusieurs équipes de recherche dont je fais partie. L'objectif de ce travail est de développer un système MOST fondé sur des molécules sensibles à un déclencheur acide. L'énergie y est stockée par conversion photo-induite d'une forme stable vers un isomère plus énergétique, puis restituée par une réaction thermique inverse déclenchée en présence d'acide. Encore peu exploré dans ce domaine, l'usage de l'acidité comme stimulus présente pourtant de nombreux atouts : les acides sont peu coûteux, non toxiques à faible dose, faciles à neutraliser et compatibles avec de nombreux environnements chimiques. Leur caractère réversible par ajout de base et modulable ouvre la voie à de multiples cycles de charge et de décharge, en accord avec les exigences de durabilité des technologies MOST de demain.

Pour relever ce défi, l'équipe a choisi d'explorer une famille prometteuse de photochromes : les diaryléthènes [7]. Reconnus pour leurs excellents rendements de photoconversion, leur grande stabilité thermique et leur forte résistance à la fatigue, ils sont particulièrement adaptés au stockage solaire moléculaire, bien que peu d'exemples d'application MOST aient été rapportés à ce jour. Les chercheurs ont alors conçu et étudié deux diaryléthènes fonctionnalisés par des groupements protonables, judicieusement positionnés au sein de la molécule [8].

L'étude de ces molécules a confirmé leur potentiel exceptionnel pour le stockage solaire thermique moléculaire. Capables

d'absorber efficacement la lumière, en particulier le rayonnement ultraviolet émis par le Soleil, elles se transforment en un isomère de plus haute énergie, apte à emmagasiner cette énergie sur des durées remarquables, allant de quelques jours à plusieurs années. À l'inverse, l'acidification du milieu agit comme un véritable « interrupteur thermique » : elle déclenche la réaction de retour et permet la libération de l'énergie sur des échelles de temps bien plus courtes, de quelques minutes à quelques heures. Avec une capacité de stockage de l'ordre de $100 \text{ kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$, ces composés pourraient théoriquement générer des élévations de température de plusieurs dizaines de degrés. Ces performances, combinées à leur stabilité sur le long terme et à l'efficacité du déclenchement acide, les placent parmi les systèmes MOST les plus prometteurs décrits à ce jour dans la littérature scientifique.

Mais l'innovation ne s'arrête pas là. L'un des aspects les plus marquants de ce travail réside dans l'exploitation du caractère catalytique de l'acide lors de la réaction de libération thermique. Contrairement aux approches classiques nécessitant un excès d'agent déclencheur, une simple quantité catalytique suffit ici à activer le processus. Cette stratégie renforce à la fois la durabilité et la recyclabilité du système. Une étude cinétique approfondie, combinant mesures expérimentales et modélisation numérique, a permis de décrypter le mécanisme réactionnel et de quantifier précisément l'efficacité de cette catalyse acide. Il s'agit d'un cas encore rare d'élucidation complète du mécanisme de libération d'énergie dans un système MOST. En mettant en lumière les phénomènes fondamentaux qui gouvernent cette réaction, ce travail ouvre la voie à une conception moléculaire plus rationnelle et plus performante pour les futurs matériaux de stockage solaire.

Ce projet illustre comment une approche interdisciplinaire, alliant chimie moléculaire, ingénierie des procédés et modélisation, peut transformer un concept fondamental en une solution énergétique concrète. Il s'inscrit pleinement dans les défis actuels liés à la transition énergétique et ouvre la voie à des systèmes autonomes et renouvelables.

Léa Chocron tient à remercier toutes les personnes ayant participé à ce projet, en particulier Dr. Fanny Schnetz (pour le schéma du système fluïdique), Dr. Pei Yu, Pr. Keitaro Nakatani et Dr. Rémi Métivier.

- [1] Z. Wang, Y. Hu, S. Zhang, Y. Sun, Artificial photosynthesis systems for solar energy conversion and storage: platforms and their realities, *Chem. Soc. Rev.*, **2022**, *51*, p. 6704-37, <https://doi.org/10.1039/D1CS01008E>
- [2] J. Piard, Le photochromisme : définition et applications, *Le Bup*, **2013**, *107*, p. 549-59.
- [3] Z. Wang *et al.*, Storing energy with molecular photoisomers, *Joule*, **2021**, *5*, p. 3116-36, <https://doi.org/10.1016/j.joule.2021.11.001>
- [4] G. Jones II, S.-H. Chiang, P.T. Xuan, Energy storage in organic photoisomers, *J. Photochem.*, **1979**, *10*, p. 1-8, [https://doi.org/10.1016/0047-2670\(79\)80034-9](https://doi.org/10.1016/0047-2670(79)80034-9)
- [5] J. Orrego-Hernández, A. Dreos, K. Moth-Poulsen, Engineering of norbornadiene/quadracyclane photoswitches for molecular solar thermal energy storage applications, *Acc. Chem. Res.*, **2020**, *53*, p. 1478-87, <https://doi.org/10.1021/acs.accounts.0c00235>
- [6] Z. Wang *et al.*, Macroscopic heat release in a molecular solar thermal energy storage system, *Energy Environ. Sci.*, **2019**, *12*, p. 187-93, <https://doi.org/10.1039/C8EE01011K>
- [7] M. Irie, T. Fukaminato, K. Matsuda, S. Kobatake, Photochromism of diarylethene molecules and crystals: memories, switches, and actuators, *Chem. Rev.*, **2014**, *114*, p. 12174-277, <https://doi.org/10.1021/cr500249p>
- [8] L. Chocron *et al.*, Acid-sensitive photoswitches: towards catalytic on-demand release of stored light energy, *Chem. Sci.*, **2024**, *15*, p. 16034-9, <https://doi.org/10.1039/D4SC04973J>

Léa CHOCRON a été doctorante au laboratoire PPSM de l'ENS Paris Saclay. Elle est lauréate du Prix Jeunes Talents France L'Oréal-UNESCO Pour les Femmes et la Science 2025.

* lea.chocron@ens-paris-saclay.fr





Spins ordonnés vs température : la bataille des aimants moléculaires

Rosa DIEGO CREIXENTI

Résumé Les aimants sont des composants essentiels de nombreux dispositifs technologiques, mais la plupart sont inorganiques, denses et dépendent des terres rares, ce qui pose des défis environnementaux, économiques et de conception. Les réseaux métallo-organiques (MOF) offrent une alternative modulable, combinant centres métalliques et ligands organiques pour contrôler la connectivité et les interactions de spin. Cela permet de créer des aimants aux propriétés ajustables, plus légers, plus polyvalents et durables. Atteindre des températures de transition magnétique élevées dans les MOF reste un défi, car les interactions entre centres métalliques médiées par les ligands organiques sont généralement faibles. Des réductions chimiques *in situ* ou post-synthétiques peuvent renforcer ces interactions, introduire des porteurs de spin supplémentaires et améliorer les couplages, rapprochant ces matériaux d'une utilisation pratique proche de la température ambiante. Cet article présente les concepts fondamentaux du magnétisme, les types d'ordre magnétique et les approches de conception de MOF magnétiques à haute température critique.

Mots-clés Réseaux métallo-organiques, magnétisme moléculaire, ordre magnétique, interactions de spin, ligands radicalux.

Abstract **Ordered spins vs. temperature: the battle of molecular magnets**

Magnets are essential components in numerous technological devices, yet most are inorganic, dense, and reliant on rare-earth elements, which pose environmental, economic, and design challenges. Metal-organic frameworks (MOFs) provide a modular alternative, combining metal centers and organic ligands to control connectivity and spin interactions. This allows the creation of magnets with tunable properties, which are lighter, more versatile, and sustainable. Achieving high magnetic ordering temperatures in MOFs remains challenging because the interactions between metal centers mediated by organic linkers are typically weak. *In situ* or post-synthetic chemical reductions can strengthen these interactions, introducing additional spin carriers and enhancing spin couplings, bringing these materials closer to practical use near room temperature. This article presents fundamental concepts of magnetism, the types of magnetic order, and approaches for designing high- T_C magnetic MOFs.

Keywords Metal-organic frameworks, molecular magnetism, magnetic order, spin interactions, radical ligands.

<https://doi.org/10.63133/scf.act-chim.2026.512.04>

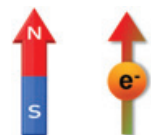
Les aimants sont des composants essentiels dans de nombreux dispositifs et technologies, des smartphones et ordinateurs aux appareils électroménagers, en passant par le stockage de données et les moteurs industriels pour l'automobile et les énergies renouvelables [1]. Malgré leur omniprésence, la plupart sont des matériaux denses, rigides et purement inorganiques, constitués de métaux purs, d'oxydes métalliques ou d'alliages métalliques, ce qui limite la possibilité de moduler finement leurs propriétés et de concevoir des aimants optimisés. Leur composition repose en outre fréquemment sur des éléments de terres rares, dont l'extraction est complexe et les ressources concentrées dans certaines régions du monde [2,3]. Cette dépendance pose des problèmes environnementaux, socioéconomiques et d'approvisionnement, auxquels s'ajoute l'utilisation fréquente de procédés de fabrication à haute température, fortement consommateurs d'énergie [4]. Dans ce contexte, les aimants moléculaires apparaissent comme une alternative prometteuse [5]. Fondés sur l'assemblage de briques moléculaires abondantes et accessibles, ils peuvent être obtenus par des approches de synthèse plus douces, conduisant à des matériaux nettement plus légers (densité d'environ $1 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$, contre généralement plus de $5 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ pour les aimants inorganiques conventionnels). Leur grande modulabilité permet en outre d'ajuster finement leurs propriétés, voire d'intégrer plusieurs

fonctions au sein d'une même architecture, ouvrant ainsi la voie à des systèmes aux performances inédites, difficilement envisageables avec leurs homologues inorganiques.

À l'origine du magnétisme

Un aimant est un matériau capable de produire un champ magnétique et caractérisé par la présence de deux pôles opposés, nord et sud. Ce champ est responsable des forces d'attraction ou de répulsion observées entre aimants, selon leur orientation relative. Le plus souvent, on le représente sous la forme familière d'un aimant en fer à cheval, mais il peut aussi être schématisé par une flèche indiquant la direction de son aimantation, du pôle sud vers le pôle nord.

Ces propriétés, observées à l'échelle macroscopique, trouvent leur origine à une dimension bien plus petite, liée à la structure interne de la matière. Elles reposent sur la présence d'électrons non appariés – ou électrons (e^-) célibataires – qui portent chacun un moment magnétique. L'origine principale de ces moments est associée au spin des électrons, une propriété quantique que l'on représente également par une flèche afin d'en visualiser l'orientation. Ainsi, l'analogie entre la flèche décrivant l'aimant macroscopique et celle représentant



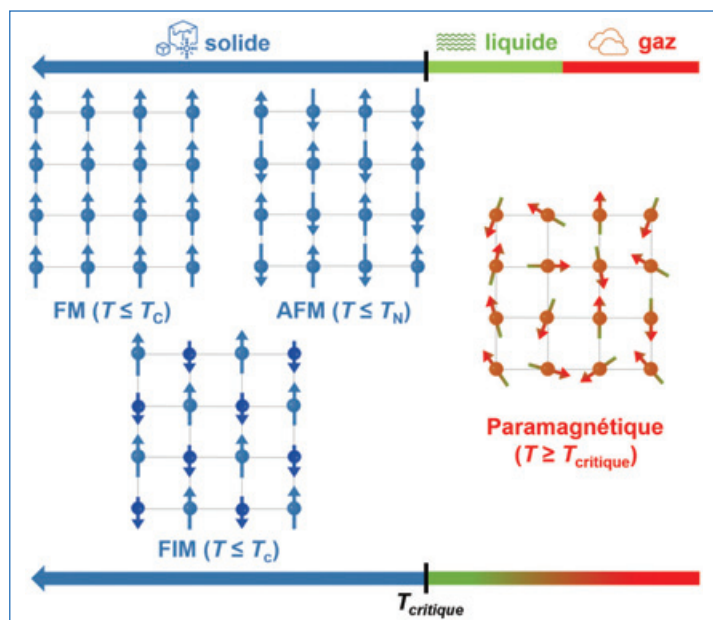


Figure 1 - Représentation schématique des différentes classes de matériaux magnétiques. Les systèmes ferromagnétiques (FM), antiferromagnétiques (AFM) et ferrimagnétiques (FIM) correspondent à des arrangements ordonnés de spins sous leur température critique ($T \leq T_C$ ou T_N). Au-delà de cette température, le système entre dans le régime paramagnétique, où les spins sont désordonnés. L'analogie avec les états de la matière (solide, liquide et gaz) illustre qualitativement la transition de phase entre un état magnétisé et un régime paramagnétique sous l'effet de l'agitation thermique.

le spin (S) électronique reflète une même réalité physique : des moments magnétiques orientés à l'origine du magnétisme des matériaux [6].

Quand les spins s'alignent

Dans un matériau magnétique, les spins des électrons peuvent s'orienter de manière concertée, donnant naissance à un champ magnétique macroscopique, c'est-à-dire observable à l'échelle du matériau. Un tel comportement collectif n'est possible que si les électrons non appariés sont suffisamment proches pour interagir entre eux, *via* ce que l'on appelle des interactions d'échange (notées J). Les matériaux magnétiques se classent ainsi en systèmes ferromagnétiques (FM), antiferromagnétiques (AFM) et ferrimagnétiques (FIM), selon la manière dont interagissent les spins voisins (figure 1). Dans les systèmes FM, les moments magnétiques s'alignent parallèlement. Dans les AFM, les spins s'orientent antiparallèlement avec une amplitude égale, conduisant à une absence de moment magnétique global. Les FIM présentent également un alignement antiparallèle, mais avec des moments de magnitudes différentes, ce qui génère un moment magnétique net. Cependant, cette organisation des spins est constamment concurrencée par la température, qui tend à désordonner leurs orientations [7].

Le comportement magnétique résulte ainsi de la compétition entre les interactions magnétiques (J), qui favorisent l'ordre, et l'énergie thermique ($k_B T$), qui tend à le détruire.

Une analogie simple est celle de la transition d'un liquide vers un solide : lorsque la température diminue, l'agitation thermique se réduit et le système peut adopter une structure ordonnée, comme l'eau qui se solidifie en glace. De manière similaire, lorsque l'agitation thermique devient suffisamment faible face aux interactions magnétiques, les spins peuvent s'organiser collectivement selon les états FM, AFM et FIM

décrits précédemment. En dessous d'une température critique (température de Curie T_C pour les FM et FIM, température de Néel T_N pour les AFM), un ordre magnétique s'établit (avec une aimantation spontanée dans les FM). Au-dessus de cette température, l'agitation thermique domine, les orientations deviennent désordonnées et le matériau devient paramagnétique.

Les réseaux métallo-organiques comme aimants

Les réseaux métallo-organiques, ou MOF (pour « *metal-organic frameworks* »), constituent une classe de matériaux cristallins obtenus par l'assemblage de centres métalliques et de ligands organiques en architectures périodiques reposant sur les principes de la chimie de coordination. Cette approche modulaire permet de combiner presque à volonté les constituants afin de concevoir des structures aux propriétés sur mesure à l'échelle moléculaire. L'importance de ces matériaux dans la chimie contemporaine a été largement reconnue, notamment par l'attribution du prix Nobel de chimie en 2025 [8], qui a mis en lumière leur potentiel exceptionnel dans des domaines variés tels que le stockage et la séparation des gaz, la catalyse, la détection ou encore l'énergie [9]. Au-delà de ces applications, les MOF offrent également un terrain particulièrement prometteur pour le développement de nouveaux matériaux magnétiques [10]. Dans ces systèmes, les centres métalliques, généralement des ions paramagnétiques porteurs d'électrons non appariés, constituent les sources des spins. Ils sont reliés entre eux par des ligands organiques qui jouent le rôle de ponts chimiques, assurant la connexion entre ces centres magnétiques.

À la différence des aimants inorganiques conventionnels, où les centres magnétiques sont séparés par des distances très courtes au sein du réseau cristallin, ce qui permet des interactions fortes entre spins et conduit à l'apparition d'un champ magnétique macroscopique, les matériaux moléculaires présentent en général des espacements plus importants entre ions métalliques, imposés par la taille des ligands organiques [11]. Cette augmentation des distances se traduit par des interactions magnétiques plus faibles, conduisant à une forme de dilution magnétique. En conséquence, les températures auxquelles un ordre magnétique collectif peut apparaître restent souvent basses, typiquement bien inférieures à -150°C , ce qui a longtemps limité l'utilisation de ces matériaux dans des applications pratiques, malgré leur grande flexibilité chimique et structurale.

C'est précisément ici que se joue la bataille des aimants moléculaires : renforcer les interactions entre spins pour élever les températures de fonctionnement (c'est-à-dire les températures critiques).

Les températures de fonctionnement des aimants dépendent des applications. Pour les aimants moléculaires, dépasser 77 K (température de l'azote liquide) constitue déjà une étape importante, tandis que le fonctionnement à température ambiante reste particulièrement recherché [12]. Certaines applications imposent toutefois des contraintes bien plus élevées, pouvant atteindre $150\text{-}200^\circ\text{C}$ dans les moteurs électriques et plusieurs centaines de degrés, parfois jusqu'à 500°C , dans le domaine aérospatial [1]. Atteindre de telles températures nécessite donc des architectures capables d'intensifier les interactions magnétiques entre centres porteurs de spin.

Parmi les approches les plus efficaces pour renforcer les interactions magnétiques figurent l'utilisation de ligands courts favorisant le couplage entre centres métalliques, ainsi que l'emploi de ligands radicalaires portant un spin non apparié, capables de participer directement aux interactions magnétiques. Ces stratégies ont conduit à des avancées remarquables ces dernières années.

Ligands courts : rapprocher les centres magnétiques

Plus la distance entre centres magnétiques, et donc entre spins, est courte, plus les interactions d'échange peuvent être efficaces. Dans certains matériaux inorganiques conventionnels, notamment les oxydes métalliques, des anions monoatomiques pontants comme l'oxygène assurent ainsi des couplages magnétiques forts. Dans les systèmes moléculaires, l'un des ligands les plus courts que l'on puisse envisager est l'ion cyanure (CN^-), un pont diatomique diamagnétique capable de transmettre efficacement les interactions d'échange magnétique entre centres métalliques voisins. À ce titre, les analogues du bleu de Prusse en constituent un exemple emblématique [13,14]. Ces matériaux correspondent à des réseaux tridimensionnels cyanure-pontés entre deux types d'ions métalliques, dont la structure dérive du composé historique $\text{Fe}^{\text{III}}_4[\text{Fe}^{\text{II}}(\text{CN})_6]_3$ (figure 2) [15]. La brièveté du ligand cyanure et son efficacité dans la médiation du couplage magnétique permettent d'obtenir des interactions particulièrement fortes, favorisées par la forte covalence du ligand, l'efficacité de ses orbitales π et la connectivité tridimensionnelle du réseau. Le record actuel de température d'ordre pour cette famille est d'environ 103 °C, observé dans le composé FIM $\text{KV}^{\text{II}}[\text{Cr}^{\text{III}}(\text{CN})_6] \cdot 2\text{H}_2\text{O} \cdot 0.1\text{KOTf}$ (OTf : trifluorométhanesulfonate) [16].

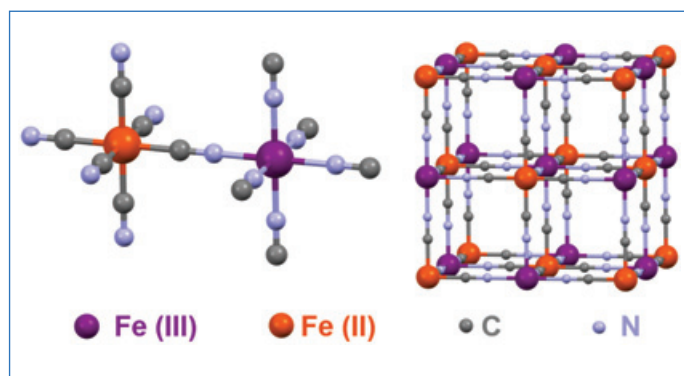


Figure 2 - Représentation structurale du bleu de Prusse $\text{Fe}^{\text{III}}_4[\text{Fe}^{\text{II}}(\text{CN})_6]_3$. À gauche, motif montrant le pont cyanure reliant deux centres métalliques selon une coordination $\text{Fe}(\text{II})-\text{C}\equiv\text{N}-\text{Fe}(\text{III})$. À droite, vue du réseau tridimensionnel cubique formé par l'alternance de centres $\text{Fe}(\text{II})$ (orange) et $\text{Fe}(\text{III})$ (violet) connectés par des ligands cyanure. Cette connectivité étendue et la brièveté du pont CN favorisent des interactions magnétiques efficaces. Les atomes de carbone et d'azote sont représentés respectivement en gris et bleu.

Ligands radicalaires : spins sur le ligand

Au-delà de la distance entre centres magnétiques, la nature électronique du ligand peut également jouer un rôle déterminant dans la force des interactions d'échange. Un ligand radicalaire porte lui-même un électron non apparié et peut agir comme un relais magnétique entre centres métalliques paramagnétiques, contrairement aux ligands diamagnétiques, introduisant ainsi des porteurs de spin supplémentaires au sein du réseau. L'efficacité de cette interaction dépend fortement des propriétés du pont organique : une coordination forte favorise le mélange des orbitales métal-ligand, tandis

qu'une délocalisation importante de l'électron célibataire permet une transmission plus efficace des interactions magnétiques entre ions métalliques.

Ces ligands radicalaires peuvent être générés par des processus redox, c'est-à-dire des transferts d'électrons conduisant à l'introduction d'un électron supplémentaire sur le ligand, qui devient alors une espèce radicalaire porteuse de spin et active magnétiquement. Cette réduction peut intervenir soit directement lors de la formation du matériau (*in situ*), soit après la synthèse par l'ajout d'un agent réducteur externe, selon une approche dite de réduction post-synthétique.

- Lorsqu'ils sont générés *in situ*, le transfert d'électron se produit pendant la formation du réseau de coordination, au cours de l'assemblage des ions métalliques et des ligands, souvent *via* des échanges électroniques entre le métal et le ligand. C'est notamment le cas dans les composés à base de tétracyanoéthylène (TCNE), une molécule organique comportant quatre groupes nitrile reliés à un motif central $\text{C}=\text{C}$, dont la réduction conduit à une forte délocalisation du spin sur l'ensemble du ligand. Cette délocalisation favorise des interactions magnétiques intenses entre centres métalliques dans des réseaux tridimensionnels présentant un ordre magnétique, comme dans les matériaux $\text{V}^{\text{II}}[\text{TCNE}]_x \cdot y$ (solvant) ($x \approx 2$), parmi les premiers aimants moléculaires à atteindre des températures critiques proches de 400 K [17].

- D'autres systèmes à ligands radicalaires peuvent être obtenus par réduction chimique de réseaux de coordination déjà formés à l'aide d'agents réducteurs externes (réduction post-synthétique), permettant ainsi d'introduire des spins supplémentaires sur les ligands et de renforcer les interactions magnétiques [18-21]. Cette stratégie a notamment été appliquée à des réseaux de coordination bidimensionnels à base de pyrazine (pyz), tels que $\text{Cr}^{\text{III}}\text{Cl}_2(\text{pyz})_2$ ou $\text{Cr}^{\text{II}}(\text{OSO}_2\text{CH}_3)_2(\text{pyz})_2$, présentant initialement des températures d'ordre modestes ($T_c \approx -218$ °C et $T_N < -263$ °C, respectivement) [22,23].

L'histoire des aimants à pyrazine radicalaire

La pyrazine est un ligand particulièrement adapté à la conception d'aimants moléculaires. Bis-monodentate, elle peut se coordonner à deux centres métalliques et permettre la formation de réseaux bidimensionnels. Sa petite taille rapproche les centres métalliques, tandis que son caractère aromatique facilite la délocalisation électronique et la transmission du couplage magnétique. Son activité redox permet enfin d'introduire des électrons supplémentaires dans le réseau, conduisant à l'apparition d'espèces radicalaires et à des interactions magnétiques renforcées.

La réduction de la pyrazine neutre en espèce radicalaire a été mise en évidence dès les premières études de résonance paramagnétique électronique (RPE), réalisées sur des mélanges de métaux alcalins avec la molécule organique [24,25]. Peu après, quelques réactions avec des ions métalliques de transition ont permis d'obtenir les premiers exemples de pyrazine radicalaire coordonnée, démontrant son potentiel comme ligand actif magnétiquement [26,27]. Néanmoins, la pyrazine radicalaire reste rare dans les systèmes métallo-organiques étendus, contrairement à la pyrazine neutre, largement présente dans des milliers de structures cristallines [26-29]. À ce jour, seuls quelques systèmes moléculaires discrets contenant de la pyrazine radicalaire ont été caractérisés structurellement [30-33], ainsi que les systèmes étendus présentés ci-dessous.

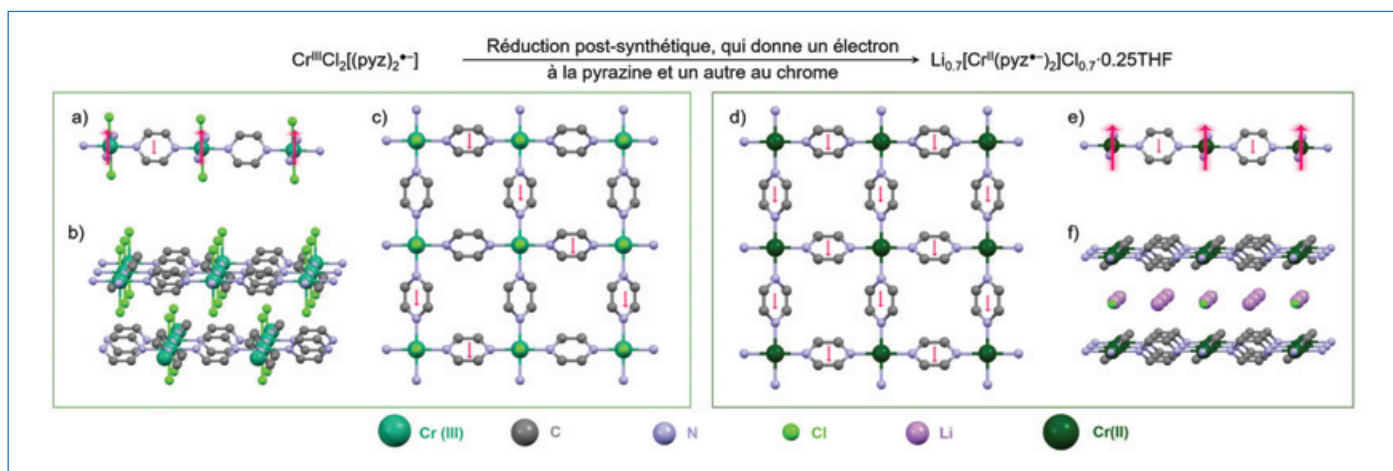


Figure 3 - **Construire un aimant moléculaire à partir d'un réseau chrome-pyrazine.** À gauche : composé précurseur $\text{Cr}^{\text{III}}\text{Cl}_2[(\text{pyz})_2]^+$. À droite : matériau obtenu après réduction post-synthétique, conduisant à l'aimant moléculaire $\text{Li}_{0.7}[\text{Cr}^{\text{II}}(\text{pyz}^{\bullet-})_2]\text{Cl}_{0.7}\cdot 0.25\text{THF}$. (a) Fragment du précurseur montrant l'arrangement magnétique, avec des interactions antiferromagnétiques entre les centres de chrome médiées par les ligands pyrazine ; une seule des deux pyrazines pontantes est à l'état radicalaire. Les grandes flèches représentent les spins portés par les ions chrome, tandis que les flèches plus petites correspondent aux spins localisés sur les ligands pyrazine radicalaires. (b) Vue en perspective de la structure lamellaire du composé précurseur. (c) Vue selon l'axe c mettant en évidence le réseau carré formé par les ions chrome et les ligands pyrazine, avec seulement la moitié des ligands à l'état radicalaire. (d) Vue selon l'axe c après réduction, où tous les ligands pyrazine sont à l'état radicalaire, contrairement au précurseur, les petites flèches indiquant l'arrangement ferrimagnétique au sein du réseau carré. (e) Fragment du composé réduit montrant l'arrangement magnétique, avec des interactions antiferromagnétiques entre les spins des centres de chrome médiées par des ligands pyrazine entièrement radicalaires ; la taille des flèches suit la convention définie en (a). (f) Vue en perspective de la structure lamellaire après réduction, montrant des centres de chrome à géométrie carrée plane ainsi que l'intercalation d'espèces Li^+ et Cl^- entre les couches.

Un ferrimagnétique conducteur moléculaire

Dans ce contexte, des travaux menés au sein du groupe Matériaux Moléculaires et Magnétisme (M3) du Centre de Recherche Paul Pascal (CRPP) ont permis de franchir une étape importante dans le développement d'aimants moléculaires à base de pyrazine. La réaction d'un sel de chrome(III) avec un large excès de pyrazine, suivie d'un traitement thermique à environ 200 °C sous atmosphère d'argon, conduit à un solide noir constitué d'un réseau bidimensionnel dans lequel les centres de chrome sont reliés par des ligands pyrazine selon une organisation carrée, tandis que des ions chlorure occupent les positions axiales, complétant l'environnement de coordination octaédrique autour de chaque centre métallique (figure 3, gauche) [22]. Une étude approfondie de ce matériau a mis en évidence un transfert électronique métal-ligand depuis les centres $\text{Cr}(\text{II})$ vers les ligands organiques (c'est-à-dire un processus redox *in situ*), conduisant à la formation de pyrazines radicalaires ($S = 1/2$) et de centres de chrome formellement décrits comme $\text{Cr}(\text{III})$. Chaque centre de chrome est ainsi associé à une pyrazine radicalaire et une pyrazine neutre (figure 3, a et c). Les interactions magnétiques entre les centres de chrome et les ligands radicalaires conduisent à un état FIM, avec une température de blocage d'environ - 221 °C. Au-delà de ses propriétés magnétiques, ce matériau présente également un comportement semiconducteur, avec l'une des conductivités électriques les plus élevées rapportées pour cette classe de solides moléculaires à température ambiante. Cette conductivité relativement élevée est liée à la réduction partielle des ligands, qui favorise le transport de charge entre pyrazines radicalaires et neutres. L'ensemble de ces propriétés met en évidence le caractère multifonctionnel du matériau, combinant ordre magnétique et transport électronique au sein d'un même réseau moléculaire.

Un aimant moléculaire à T_c record

Afin d'améliorer les performances magnétiques, une stratégie de modification chimique post-synthétique a été développée en utilisant le lithium 1,2-dihydroacénaftylnéide comme

agent réducteur, pour introduire des électrons supplémentaires dans le réseau et renforcer les interactions entre spins. Le matériau obtenu, de formule $\text{Li}_{0.7}[\text{Cr}^{\text{II}}(\text{pyz}^{\bullet-})_2]\text{Cl}_{0.7}\cdot 0.25\text{THF}$ (figure 3, droite), est constitué de couches $\text{Cr}(\text{pyrazine})_2$ séparées par des espèces chlorure de lithium intercalées [34]. Bien que l'architecture reste proche de celle du composé initial, ce traitement s'accompagne de la réduction des ligands pyrazine et des centres métalliques, ainsi que du départ des ions chlorure initialement en position axiale, conduisant à des centres de chrome(II) adoptant une géométrie carrée plane. L'ensemble des ligands pyrazine est alors sous forme radicalaire, conduisant à une configuration électronique dans laquelle les centres de chrome et les ligands organiques participent conjointement aux interactions magnétiques. La proximité entre ces centres favorise des interactions d'échange intenses, conduisant à un ordre magnétique persistant jusqu'à 242 °C, une température record pour cette classe d'aimants moléculaires.

Au-delà des températures critiques record atteintes pour les systèmes moléculaires, il est important de souligner que ce matériau présente également des champs coercitifs (H_c) de grande amplitude, traduisant une forte résistance à la désaimantation (figure 4) [7]. Dans cet aimant à base de pyrazine, des valeurs pouvant atteindre environ 7500 oersteds (Oe) à température ambiante sont obtenues, comparables à celles de certains aimants inorganiques conventionnels tels que les ferrites ($\approx 1100\text{-}3100$ Oe) ou certains alliages AlNiCo ($\approx 600\text{-}1900$ Oe), et se rapprochant de l'intervalle des aimants aux terres rares comme $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ ($\approx 9300\text{-}27000$ Oe) [1]. Cette combinaison d'une température d'ordre élevée et d'une dureté magnétique notable constitue une avancée importante vers le développement d'aimants permanents moléculaires fonctionnels.

Ces résultats illustrent le potentiel remarquable de la chimie de coordination pour la conception d'aimants moléculaires plus performants. Les réseaux métallo-organiques sont des matériaux très modulables, dans lesquels le choix du métal

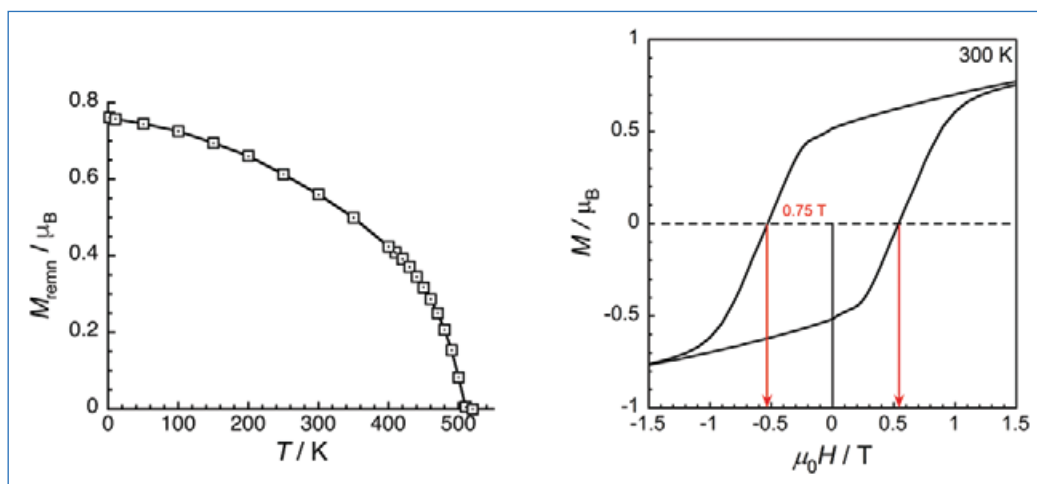


Figure 4 - Dépendance en température de l'aimantation rémanente (à gauche), montrant la persistance d'un ordre ferrimagnétique jusqu'à 515 K (242 °C), et boucle d'hystérésis magnétique mesurée à 300 K (\approx température ambiante) (à droite), mettant en évidence un champ coercitif élevé caractéristique d'une forte résistance à la désaimantation.

ou du ligand permet de renforcer les interactions magnétiques. Dans cette même approche, des études fondées sur des réseaux à base de pyrazine redox-active et de différents métaux de transition 3d précoces ont mis en évidence une grande diversité de comportements électroniques et magnétiques, allant par exemple d'un métal paramagnétique fortement corrélé dans des systèmes à base de titane à un isolant antiferromagnétique pour le vanadium, ou encore à un semi-conducteur ferrimagnétique pour le chrome [22,35]. Par ailleurs, les stratégies de réduction post-synthétique offrent une approche complémentaire, permettant d'injecter des électrons supplémentaires dans le réseau tout en conservant, dans certains cas, l'architecture bidimensionnelle initiale, et ainsi d'intensifier les interactions magnétiques sans modifier profondément la structure. Ces avancées laissent entrevoir le développement de nouveaux matériaux magnétiques moléculaires, plus légers et potentiellement plus durables, qui pourraient à terme compléter les aimants inorganiques conventionnels dans certaines applications technologiques.

L'auteure remercie le groupe Molecular Materials and Magnetism (M3), dirigé par Rodolphe Clérac, dont les travaux pionniers sur les réseaux étendus à base de pyrazine radicalaire ont largement contribué à structurer ce domaine de recherche et à ouvrir de nouvelles perspectives dans le développement de matériaux magnétiques moléculaires.

[1] O. Gutfleisch *et al.*, Magnetic materials and devices for the 21st century: stronger, lighter, and more energy efficient, *Adv. Mater.*, **2011**, *23*, p. 821-42, <https://doi.org/10.1002/adma.201002180>
 [2] G.A. Campbell, Rare earth metals: a strategic concern, *Miner. Econ.*, **2014**, *27*, p. 21-31, <https://doi.org/10.1007/s13563-014-0043-y>
 [3] J.M.D. Coey, Perspective and prospects for rare earth permanent magnets, *Engineering*, **2020**, *6*, p. 119-31, <https://doi.org/10.1016/j.eng.2018.11.034>
 [4] C. Sirisathitkul, Y. Sirisathitkul, Recent developments in 3D printing of rare-earth-free permanent magnets, *Inventions*, **2022**, *7*, 71, <https://doi.org/10.3390/inventions7030071>
 [5] E. Coronado, Molecular magnetism: from chemical design to spin control in molecules, materials and devices, *Nat. Rev. Mater.*, **2020**, *5*, p. 87-104, <https://doi.org/10.1038/s41578-019-0146-8>
 [6] O. Kahn, *Molecular Magnetism*, VCH Publisher Inc., **1993**.
 [7] J.M.D. Coey, *Magnetism and Magnetic Materials*, Cambridge University Press, **2010**.
 [8] J. Robinson, 2025 chemistry Nobel prize goes to the scientists behind metal-organic frameworks, *Chemistry World*, www.chemistryworld.com/news/2025-chemistry-nobel-prize-goes-to-the-scientists-behind-metal-organic-frameworks/4022287.article
 [9] H. Furukawa, K.E. Cordova, M.O. Keeffe, O.M. Yaghi, The chemistry and applications of metal-organic frameworks, *Science*, **2013**, *341*, 1230444, <https://doi.org/10.1126/science.1230444>
 [10] A.E. Thorarindottir, T.D. Harris, Metal-organic framework magnets, *Chem. Rev.*, **2020**, *120*, p. 8716-89, <https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.9b00666>
 [11] J.S. Miller, Magnetically ordered molecule-based materials, *Chem. Soc. Rev.*, **2011**, *40*, p. 3266-96, <https://doi.org/10.1039/C0CS00166J>
 [12] J.S. Miller, S. Ohkoshi, *Molecular Magnetic Materials: Concepts and Applications*, John Wiley & Sons, **2017**.
 [13] M. Shatruk, C. Avendano, K.I.M.R. Dunbar, *Cyanide-Bridged Complexes of Transition Metals: A Molecular Magnetism Perspective in Progress in Inorganic Chemistry*, John Wiley & Sons, **2009**, *56*, p. 156-334 <https://doi.org/10.1002/9780470440124.ch3>

[14] D. Aguilà, Y. Prado, E.S. Koumoussi, C. Mathonière, R. Clérac, Switchable Fe/Co Prussian blue networks and molecular analogues, *Chem. Soc. Rev.*, **2016**, *45*, p. 203-24, <https://doi.org/10.1039/C5CS00321K>
 [15] H.J. Buser, D. Schwarzenbach, W. Petter, A. Ludi, The crystal structure of Prussian Blue: Fe₄[Fe(CN)₆]₃·xH₂O, *Inorg. Chem.*, **1977**, *16*, p. 2704-10, <https://doi.org/10.1021/ic50177a008>
 [16] S.M. Holmes, G.S. Girolami, Sol-gel synthesis of K^{VI}[Cr^{III}(CN)₆]-2H₂O: a crystalline molecule-based magnet with a magnetic ordering temperature above 100°C, *J. Am. Chem. Soc.*, **1999**, *121*, p. 5593-4, <https://doi.org/10.1021/ja990946c>
 [17] J.M. Manriquez, G.T. Yee, R.S. Mclean, A.J. Epstein, J.S. Miller, A room-temperature molecular/organic-based magnet, *Science*, **1991**, *252*, p. 1415-7, <https://doi.org/10.1126/science.252.5011.1415>
 [18] K. Taniguchi, J. Chen, Y. Sekine, H. Miyasaka, Magnetic phase switching in a tetraoxolene-bridged honeycomb ferrimagnet using a lithium ion battery system, *Chem. Mater.*, **2017**, *29*, p. 10053-9, <https://doi.org/10.1021/acs.chemmater.7b03691>
 [19] L. Liu, J.A. Degayner, L. Sun, D.Z. Zee, T.D. Harris, Reversible redox switching of magnetic order and electrical conductivity in a 2D manganese benzoquinoid framework, *Chem. Sci.*, **2019**, *10*, p. 4652-61, <https://doi.org/10.1039/C9SC00606K>

[20] J.A. DeGayner, I.R. Jeon, L. Sun, M. Dincă, T.D. Harris, 2D Conductive iron-quinoid magnets ordering up to $T_c = 105$ K via heterogenous redox chemistry, *J. Am. Chem. Soc.*, **2017**, *139*, p. 4175-84, <https://doi.org/10.1021/jacs.7b00705>
 [21] L.E. Darago, M.L. Aubrey, C.J. Yu, M.I. Gonzalez, J.R. Long, Electronic conductivity, ferrimagnetic ordering, and reductive insertion mediated by organic mixed-valence in a ferric semiquinoid metal-organic framework, *J. Am. Chem. Soc.*, **2015**, *137*, p. 15703-11, <https://doi.org/10.1021/jacs.5b10385>
 [22] K.S. Pedersen *et al.*, Formation of the layered conductive magnet CrCl₂(pyrazine)₂ through redox-active coordination chemistry, *Nat. Chem.*, **2018**, *10*, p. 1056-61, <https://doi.org/10.1038/s41557-018-0107-7>
 [23] P. Perlepe *et al.*, Cr(pyrazine)₂(OSO₂CH₃)₂: a two-dimensional coordination polymer with an antiferromagnetic ground state, *Polyhedron*, **2018**, *153*, p. 248-53, <https://doi.org/10.1016/j.poly.2018.07.011>
 [24] N.M. Atherton, A.E. Goggins, E.S.R. studies of ion association. Part 2. Structures of alkali metal-pyrazine ion-pairs, *Trans. Faraday Soc.*, **1966**, *62*, p. 1702-6, <https://doi.org/10.1039/TF9666201702>
 [25] C. Gooijer, T.G.J.J. Blekemolen, New interpretation of the ESR spectra of Li pyrazine in THF, *Chem. Phys. Lett.*, **1973**, *19*, p. 284-6, [https://doi.org/10.1016/0009-2614\(73\)85075-4](https://doi.org/10.1016/0009-2614(73)85075-4)
 [26] T.G. Dunne, J.K. Hurst, Kinetic and thermodynamic properties of chromium(III) complexes containing pyrazine radical ligands, *Inorg. Chem.*, **1980**, *19*, p. 1152-7, <https://doi.org/10.1021/ic50207a009>
 [27] J. Swartz, F.C. Anson, Electrochemistry of the intensely green complexes Formed by the reaction of chromium(2+) with pyrazine ("pyrazine green"), pyrazinecarboxamide, and pyrazinecarboxylic acid, *Inorg. Chem.*, **1981**, *7*, p. 2250-7, <https://doi.org/10.1021/ic50221a062>
 [28] B. Xia *et al.*, Photoinduced electron transfer and remarkable bridging pyrazine complexes, *Dalt. Trans.*, **2018**, *47*, p. 15888-96, <https://doi.org/10.1039/C8DT03422B>
 [29] X. Zhang, M. Wang, C. Sun, C. Yang, P. Li, Stabilizing and color tuning pyrazine radicals by coordination for photochromism, *Chem. Commun.*, **2016**, *52*, p. 7947-9, <https://doi.org/10.1039/C6CC03354G>
 [30] S. Kraft, R. Beckhaus, D. Haase, Directed reduction of six-membered nitrogen heterocycles – selective formation of polynuclear titanium complexes, *Angew. Chem. Int. Ed.*, **2004**, *43*, p. 1583-7, <https://doi.org/10.1002/anie.200353021>
 [31] S. Kraft, E. Hanuschek, R. Beckhaus, D. Haase, W. Saak, Titanium-based molecular squares and rectangles: syntheses by self-assembly reactions of titanocene fragments and aromatic N-heterocycles, *Chem. Eur. J.*, **2005**, *11*, p. 969-78, <https://doi.org/10.1002/chem.200400880>
 [32] N. Bajaj *et al.*, Hard single-molecule magnet behavior and strong magnetic coupling in pyrazinyl radical-bridged lanthanide metallocenes, *Chem.*, **2024**, *10*, p. 2484-99, <https://doi.org/10.1016/j.chempr.2024.04.006>
 [33] D. Lou *et al.*, Self-assembled tetranuclear square complex of chromium(III) bridged by radical pyrazine: a molecular model for metal-organic magnets, *J. Am. Chem. Soc.*, **2024**, *146*, p. 19649-53, <https://doi.org/10.1021/jacs.4c05756>
 [34] P. Perlepe *et al.*, Metal-organic magnets with large coercivity and ordering temperatures up to 242°C, *Science*, **2020**, *370*, p. 587-92, <https://doi.org/10.1126/science.abb3861>
 [35] P. Perlepe *et al.*, From an antiferromagnetic insulator to a strongly correlated metal in square-lattice MC₂(pyrazine)₂ coordination solids, *Nat. Commun.*, **2022**, *13*, p. 5766, <https://doi.org/10.1038/s41467-022-33342-5>

Rosa DIEGO CREIXENTI* est postdoctorante ADAGIO (MSCA COFUND) au sein du groupe Matériaux Moléculaires et Magnétisme (M₃) du Centre de recherche Paul Pascal (CRPP, CNRS/Université de Bordeaux). Elle est lauréate du Prix Jeunes Talents France L'Oréal-UNESCO *Pour les Femmes et la Science* 2025.

*rosa.creixenti@u-bordeaux.fr



Chimie des substances naturelles et engagement scientifique

Innover, transmettre, inspirer

Yolène DUCHAUDÉ

Résumé Les maladies vectorielles transmises par des moustiques comme *Aedes aegypti* représentent un enjeu majeur de santé publique mondiale. La lutte repose principalement sur l'utilisation d'insecticides de synthèse, mais l'apparition de résistances et les impacts environnementaux encouragent la recherche d'alternatives. Les plantes constituent une source riche de métabolites secondaires aux propriétés biologiques variées. L'exploration phytochimique de la biodiversité, notamment tropicale, permet ainsi d'identifier de nouvelles molécules potentiellement utiles pour la lutte antivectorielle.

Mots-clés **Maladies vectorielles, *Aedes aegypti*, phytochimie, lutte antivectorielle.**

Abstract **Phytochemical exploration for vector-borne disease**

Vector-borne diseases transmitted by mosquitoes such as *Aedes aegypti* represent a major global public health challenge. Vector control mainly relies on synthetic insecticides, but resistance development and environmental concerns highlight the need for alternatives. Plants are a rich source of secondary metabolites with diverse biological activities. Phytochemical exploration of biodiversity, particularly in tropical regions, can therefore help identify new compounds for vector control strategies.

Keywords **Vector-borne diseases, *Aedes aegypti*, phytochemistry, vector control.**

<https://doi.org/10.63133/scf.act-chim.2026.512.05>

Maladies vectorielles : un défi scientifique et sanitaire global

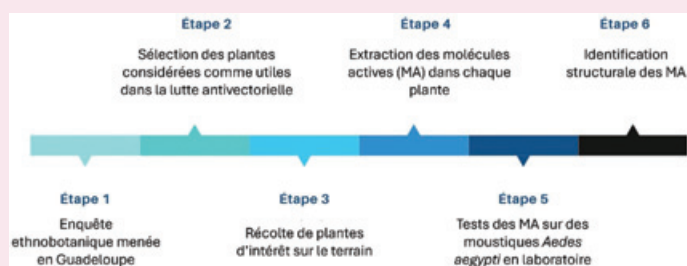
Les maladies transmises par les insectes vecteurs représentent aujourd'hui un enjeu majeur de santé publique à l'échelle mondiale [1]. Dengue, chikungunya, Zika ou encore fièvre jaune, transmises par le moustique *Aedes aegypti*, affectent chaque année des millions de personnes, principalement dans

les régions tropicales et subtropicales [2]. L'expansion géographique de certains vecteurs, favorisée par les dynamiques climatiques, l'urbanisation et la mondialisation des échanges, accentue cette pression sanitaire [3].

Depuis plusieurs décennies, la lutte antivectorielle repose principalement sur l'utilisation de divers insecticides de synthèse, appliqués sous différentes formes (pulvérisations résiduelles, imprégnation de supports, traitements larvicides)

Parcours et engagement d'une chimiste ancrée dans son territoire

Formée en chimie des ressources naturelles à l'Université des Antilles, Yolène Duchaudé a construit un parcours scientifique centré sur l'étude et la valorisation des substances naturelles issues de la biodiversité caribéenne. Major de promotion en master, elle s'est vu proposer un sujet de thèse financé par l'obtention d'une bourse ministérielle.



Étapes des travaux de thèse.

Ses travaux doctoraux, réalisés au sein du laboratoire COVACHIM-M2E en collaboration avec le Laboratoire des Maladies Vectorielles de l'Institut Pasteur de Guadeloupe, s'inscrivent dans un contexte sanitaire particulièrement préoccupant dans les territoires tropicaux et subtropicaux : la circulation de maladies transmises par les moustiques vecteurs. L'objectif scientifique consistait à caractériser des extraits végétaux issus d'espèces du jardin créole et à évaluer leur potentiel en lutte antivectorielle, particulièrement ciblé sur le moustique *Aedes aegypti*.

Originnaire de la Guadeloupe, ces travaux se basent sur le savoir transgénérationnel existant autour de l'utilisation des plantes caribéennes pour lutter contre les moustiques. L'approche

développée associe enquête ethnobotanique, extraction raisonnée et verte, caractérisation structurale et évaluation biologique, traduisant une volonté de recenser et de valider scientifiquement certains savoirs ancestraux.

La question de la place des femmes dans les disciplines de physique-chimie demeure un sujet complexe, notamment en zone insulaire et ultramarine où les modèles scientifiques féminins restent peu visibles. C'est pourquoi Yolène a pour conviction de contribuer à renforcer cette représentation et à élargir l'horizon des possibles pour les jeunes générations.

Lauréate du Prix Jeunes Talents L'Oréal-UNESCO *Pour les Femmes et la Science* 2025, elle poursuit aujourd'hui ses travaux dans une perspective de valorisation locale, avec l'ambition de développer une recherche durablement ancrée en Guadeloupe, à l'interface entre chimie, environnement et santé publique. De plus, l'organisation d'ateliers mensuels de vulgarisation est pour elle un moyen de se rapprocher de la population locale en transmettant et échangeant ses connaissances scientifiques et les savoirs existants autour des plantes caribéennes.

[4]. Leur utilisation ont permis de réduire significativement l'incidence de certaines maladies dans de nombreux territoires [5].

Par ailleurs, les interrogations relatives aux impacts environnementaux et à la sélectivité de certains insecticides (résistances aux insecticides) soulignent la nécessité d'obtenir et d'utiliser de nouvelles substances actives [6]. Face à ces limites, la diversification des stratégies chimiques permet de découvrir des sources alternatives et naturelles.

Explorer la biodiversité : un réservoir chimique sous-exploité

La phytochimie

Face à la nécessité de renouveler les outils de lutte antivectorielle, l'exploration de nouvelles sources de molécules actives devient urgente. Parmi celles-ci, les plantes ont développé au cours de l'évolution une remarquable diversité de composés chimiques – métabolites primaires et secondaires – leur permettant d'assurer leur défense, leur communication ou leur adaptation à l'environnement [7].

Ces molécules, présentent une grande variété structurale et fonctionnelle. On y retrouve des terpènes, des composés phénoliques, des alcaloïdes ou encore des coumarines qui sont associés à des propriétés biologiques d'intérêt. De plus, certaines d'entre elles sont déjà décrites dans de nombreux domaines (pharmacologie, médecine, agriculture) [8].

La répartition chimique des espèces végétales est directement dépendante du type d'extraction effectué et du type d'extrait étudié. Par exemple, les huiles essentielles ont déjà montré des activités répulsives, larvicides ou perturbatrices du comportement des femelles *Aedes aegypti* [9]. Cette diversité d'effets peut donc induire des mécanismes d'action multiples et agir sur plusieurs stades de vie du moustique (en phase aérienne ou aquatique).

L'objectif n'est pas seulement de constater un effet biologique, mais d'en comprendre l'origine chimique. C'est en ce sens que la chimie analytique joue un rôle déterminant, en permettant de caractériser les constituants majeurs, d'isoler les fractions actives et d'établir des relations entre structure et activité [10].



Image d'œufs d'*Aedes aegypti* lue à partir d'une loupe binoculaire. Crédits photo: Yolène Duchaudé.



Femelles *Aedes aegypti* lors d'un repas sanguin. Crédits photos : Yolène Duchaudé.

Dans le cas d'espèces issues de flores tropicales, la démarche de caractérisation est indispensable. De nombreuses plantes issues des jardins créoles et/ou de contrées tropicales restent peu documentées sur le plan phytochimique et ethnobotanique [11]. Les données disponibles dans la littérature peuvent être fragmentaires, parfois limitées à des identifications partielles ou à des études réalisées dans d'autres contextes géographiques. Cette absence relative de référentiel impose une approche exploratoire rigoureuse.

À l'échelle du règne végétal, plus de 20 000 métabolites secondaires ont déjà été décrits, et ce nombre continue de croître [12]. Toutefois, leur répartition dans une espèce végétal est loin d'être homogène, pouvant ainsi révéler un profil chimique original, nécessitant parfois le couplage de plusieurs techniques comme l'utilisation de la métabolomique couplée à une chromatographie sous phase gazeuse bidimensionnelle couplée à la spectrométrie de masse à temps de vol (GC-GC-MSxTOF) [13]. Cette technique est répandue pour permettre d'identifier des composés connus, mais aussi de cartographier une diversité encore partiellement ou peu décrite.

Dans ce contexte, la chimie représente un travail d'enrichissement des connaissances et un outil d'exploration, contribuant à documenter et à valoriser la biodiversité caribéenne dont les ressources restent encore largement à décrypter.

Yolène Duchaudé remercie les Docteurs Anubis-Vega-Rúa et Muriel Sylvestre, ainsi que le Dr. Gerardo Cebrian-Torrejón.

- [1] S.C. Weaver, C. Charlier, N. Vasilakis, M. Lecuit, Zika, chikungunya, and other emerging vector-borne viral diseases, *Annu. Rev. Med.*, **2018**, *69*, p. 395-408, <https://doi.org/10.1146/annurev-med-050715-105122>
- [2] M. Viglietta, R. Bellone, A.A. Blisnick, A.-B. Failloux, Vector specificity of arbovirus transmission, *Front. Microbiol.*, **2021**, *12*, 773211, <https://doi.org/10.3389/fmicb.2021.773211>
- [3] A.-B. Failloux, Les moustiques vecteurs d'arbovirus : une histoire sans fin, *Biologie Aujourd'hui*, **2019**, *212*, p. 89-99, <https://doi.org/10.1051/jbio/2018026>
- [4] N.L. Achee et al., Alternative strategies for mosquito-borne arbovirus control, *PLoS Negl. Trop. Dis.*, **2019**, *13*, e0006822, <https://doi.org/10.1371/journal.pntd.0006822>
- [5] *Handbook for Integrated Vector Management*, World Health Organization, Geneva, **2012**, www.who.int/publications/i/item/9789241502801
- [6] C.L. Moyes, et al., Contemporary status of insecticide resistance in the major *Aedes* vectors of arboviruses infecting humans, *PLoS Negl. Trop. Dis.*, **2017**, *11*, e0005625, <https://doi.org/10.1371/journal.pntd.0005625>
- [7] H.S. Elshafie, I. Camele, A.A. Mohamed, A comprehensive review on the biological, agricultural and pharmaceutical properties of secondary metabolites based-plant origin, *Int. J. Mol. Sci.*, **2023**, *24*, 3266, <https://doi.org/10.3390/ijms24043266>
- [8] M.R.S. Silvério, L.S. Espindola, N.P. Lopes, P.C. Vieira, Plant natural products for the control of *Aedes aegypti*: the main vector of important arboviruses, *Molecules*, **2020**, *25*, e3484, <https://doi.org/10.3390/molecules25153484>
- [9] P.A. Bricarello et al., Ovicidal, larvicidal and oviposition repelling action of a nanoemulsion of citronella essential oil (*Cymbopogon winterianus*) on *Cochliomyia hominivorax* (Diptera: Calliphoridae), *Journal of Asia-Pacific Entomology*, **2021**, *24*, p. 724-30, <https://doi.org/10.1016/j.aspen.2021.06.006>
- [10] G. Chatbar, **2023**, p. 1-12.
- [11] M.J. Balick, P.A. Cox, *Plants, people, and culture: the science of ethnobotany*, 2d ed., CRC Press, Boca Raton, **2021**.
- [12] O. Fiehn, Metabolomics: the link between genotypes and phenotypes, *Plant Mol. Biol.*, **2002**, *48*, p. 155-71, <http://dx.doi.org/10.1023/A:1013713905833>
- [13] S.L. Nam, A.P. de la Mata, J.J. Harynyuk, Automated screening and filtering scripts for GCxGC-TOFMS metabolomics data, *Separations*, **2021**, *8*, 84, <https://doi.org/10.3390/separations8060084>

Yolène DUCHAUDÉ* est docteure en chimie, Université des Antilles/Institut Pasteur de Guadeloupe. Elle est lauréate du Prix Jeunes Talents France L'Oréal-UNESCO Pour les Femmes et la Science 2025.

* duchaude.yolene@gmail.com



L'innovation chimique redonne une seconde vie aux textiles

Marion NÉGRIER

Résumé La valorisation de la matière s'impose aujourd'hui comme l'un des grands défis du développement durable à l'échelle mondiale. Lorsque la réutilisation atteint ses limites, le recyclage et le surcyclage ouvrent la voie à des transformations plus vertueuses des déchets, capables de redonner de la valeur à ce qui semblait perdu. Dans ce contexte, le textile, et particulièrement les mélanges de fibres, fait l'objet de nombreuses recherches et projets innovants. L'objectif est clair : révéler le potentiel de cet immense gisement de matière première encore sous-exploité. Grâce à la chimie, en repensant le devenir de ces ressources, il devient possible de réduire l'empreinte environnementale de l'industrie textile tout en préservant nos ressources naturelles.

Mots-clés **Recyclage chimique, cellulose, valorisation, déchet textile.**

Abstract **Chemical innovation gives a second life to textiles**

Material valorization has become one of the major challenges of sustainable development on a global scale. When reuse reaches its limits, recycling and upcycling offer more virtuous ways to transform waste, restoring value to materials that once seemed lost. In this context, textiles, particularly fiber blends, are the focus of numerous research efforts and innovative projects. The objective is clear: to unlock the potential of this vast yet underexploited source of raw material. Thanks to chemistry, by rethinking the future of these resources, it becomes possible to reduce the environmental footprint of the textile industry while preserving our natural resources.

Keywords **Chemical recycling, cellulose, valorization, textile waste.**

<https://doi.org/10.63133/scf.act-chim.2026.512.06>

Un gisement de matière première infini

Chaque année, plus de 120 millions de tonnes de déchets textiles sont générés dans le monde et cela ne fait qu'augmenter [1]. Mais que représente ce nombre concrètement ? Cela équivaut à une vingtaine de pyramides de Khéops, composées à 60 % de fibres synthétiques, dominées par le polyester, de 35 % de fibres naturelles, en majorité de coton, et de 5 % de fibres artificielles comme la viscose. Sur tout ce gisement de matière première, seulement 19 % sont recyclés, le reste est aujourd'hui incinéré ou enfoui, alors qu'il constitue une ressource quasiment infinie et pleinement valorisable [1]. Pourtant, la filière de collecte et tri des textiles usagés est en crise, saturée à cause d'un crucial manque de débouchés de la matière triée et préparée, et à l'importante baisse de qualité des vêtements due au phénomène de *fast fashion*, de moins en moins enclins à la réutilisation.

Un défi majeur : recycler les mélanges textiles

Si à première vue, la composition d'un t-shirt « 100 % coton » peut paraître simple... cela représente une minorité des textiles usagés. En réalité, la plupart des vêtements sont composés de multiples couches, doublures, accessoires (boutons, fermetures), de fibres mélangées aux propriétés physico-chimiques très différentes, et de divers composés chimiques. Après collecte, tri et séparation des déchets textiles en fonction de leur composition, couleur et qualité, deux types de transformation sont possibles :

- **Le recyclage mécanique**, qui consiste à découper, broyer et réutiliser des déchets textiles sous forme de chiffons industriels, isolants, rembourrages ou en tant qu'additifs dans des matériaux, mais la qualité des fibres est altérée.

- **Le recyclage chimique**, qui consiste à extraire par décomposition ou dissolution les polymères synthétiques ou naturels au niveau moléculaire afin de refilet des fibres dans une logique de boucle circulaire « textile-to-textile ».

Face aux mélanges textiles complexes à recycler, la voie mécanique montre ses limites, tandis que la voie chimique offre de nouvelles opportunités d'innovation dont la filière textile a besoin. Cependant, le fort impact environnemental de certains procédés chimiques limite leur développement et il est urgent de mettre en place des méthodes durables et économiquement viables.

Au-delà du recyclage, le surcyclage réinvente la fin de vie des déchets textiles

De nombreuses technologies se développent autour du recyclage textile-to-textile, permettant ainsi de créer une boucle fermée et donc d'offrir une circularité complète. Ces technologies sont principalement développées pour les fibres d'origine pétrosourcée comme le polyester, le polyamide, et plus récemment l'élasthanne. Le coton est également retransformé en fibres artificielles comme la viscose, originellement issue du bois. Bien que d'origines différentes, le coton et la viscose sont tous deux composés du même polymère naturel, la cellulose, constituant des cellules végétales. Les procédés de recyclage du polycoton émergent de plus en plus mais le constat est clair, les mélanges textiles manquent de nouvelles approches de valorisation.

Que faire des compositions complexes de fibres synthétiques/artificielles/naturelles ? Comment séparer ces diverses fibres peu importe leur qualité ou la présence d'additifs (colorants, apprêts) ? Et surtout, comment leur conférer une valeur ajoutée afin de proposer de nouveaux débouchés durables aux collecteurs, trieurs et préparateurs de déchets textiles ?

Un potentiel d'innovation illimité

Les projets de recherche sur le recyclage des textiles se multiplient et de nouvelles méthodes de séparation, de purification et de mise en forme voient le jour (RegioGreenTex, RE-APS, SOLSTICE) [2]. En parallèle, l'écoconception des



Le polystyrène à l'épreuve des enzymes : vers un surcyclage durable

Manon PUJOL

Résumé Les polymères synthétiques constituent un problème écologique majeur en raison de l'absence de solutions de recyclage efficaces et durables. Bien que la biocatalyse se soit récemment révélée prometteuse pour certains plastiques, les polymères vinyliques tels que le polystyrène restent très résistants à la dégradation enzymatique. Nous avons développé une double stratégie combinant la dispersion du polystyrène sous forme de nanoparticules dans l'eau et l'utilisation d'un système laccase-médiateur à haut potentiel redox. Cette approche a permis une réduction de la masse molaire jusqu'à 99 % et a produit de petites quantités d'acide benzoïque, benzaldéhyde et acétophénone.

Mots-clés Polymères, polystyrène, biocatalyse, enzyme, surcyclage, valorisation.

Abstract Polystyrene challenged by enzymes: towards sustainable upcycling

Synthetic polymers pose a major ecological concern due to the lack of efficient and sustainable recycling solutions. Although biocatalysis has recently emerged as promising for certain plastics, vinyl polymers such as polystyrene remain highly resistant to enzymatic degradation. We developed a dual strategy combining the dispersion of polystyrene into nanoparticles in water with the use of a high-redox-potential laccase-mediator system. This approach enabled up to 99% molar mass reduction and produced small amounts of benzoic acid, benzaldehyde and acetophenone.

Keywords Polymers, polystyrene, biocatalysis, enzyme, upcycling, valorisation.

<https://doi.org/10.63133/scf.act-chim.2026.512.07>

Recyclage des plastiques : des pratiques courantes aux approches biocatalytiques

Un point sur le recyclage actuel des plastiques

Avec près de 9 milliards de tonnes produites depuis les années 1950, les polymères synthétiques – principaux constituant des plastiques – sont devenus indispensables à notre mode de vie [1]. Majoritairement dérivés des ressources fossiles, ces matériaux soulèvent un enjeu environnemental majeur en raison de leur persistance dans l'environnement et du manque de solutions durables pour les recycler. À l'échelle mondiale, environ 80 % des plastiques produits ont ainsi été enfouis ou dispersés dans l'environnement, 10 % incinérés et moins de 10 % recyclés [1]. En Europe, la situation reste préoccupante : seuls près d'un tiers des déchets plastiques sont recyclés, dont la moitié est exportée hors de l'Union européenne pour être traitée [2].

Les plastiques sont principalement recyclés par voie mécanique. Peu coûteuse, cette méthode conduit généralement à des plastiques recyclés de qualité inférieure, souvent relégués à des applications de moindre valeur, telles que des additifs pour les bitumes [3]. La reconversion chimique (recyclage ou surcyclage), qui vise à décomposer les chaînes polymères en monomères ou produits à plus haute valeur ajoutée, repose sur des procédés tels que la pyrolyse, la gazéification ou les traitements hydrothermaux, très énergivores et contraignants au niveau des équipements [4]. De nouvelles voies de re/surcyclage chimique des plastiques sont aujourd'hui explorées, comme la photochimie [5]. Mais leur industrialisation n'est pas encore viable : la durabilité et le coût des catalyseurs, le recours à des solvants organiques, ainsi que la complexité de la montée en échelle constituent des freins à leur déploiement.

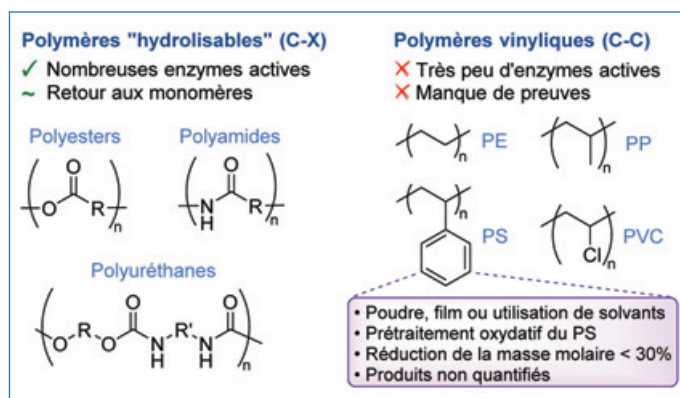


Figure 1 - Dépolymérisation enzymatique des polymères C-X et C-C.

L'approche enzymatique pour valoriser les plastiques

En parallèle, la biocatalyse, réalisée en milieu aqueux, a permis des progrès significatifs dans le recyclage des polymères dits « hydrolysables », c'est-à-dire ceux dont la chaîne principale contient des hétéroatomes, tels que le poly(téréphtalate d'éthylène) (PET), le polylactide (PLA) ou certains polyamides (figure 1) [6]. L'exemple le plus emblématique est celui de la société française CARBIOS, qui dépolymérise enzymatiquement les bouteilles en PET à l'échelle pilote, permettant de récupérer les monomères d'origine pour resynthétiser du PET en boucle fermée [7]. En revanche, les polymères non hydrolysables, constitués uniquement de liaisons C-C dans leur squelette – comme le polystyrène (PS), le polyéthylène (PE), le polypropylène (PP) ou le polyvinyle de chlorure (PVC) – restent largement résistants à la dégradation enzymatique (figure 1) [6]. Quelques travaux montrent des résultats encourageants, mais aucune approche n'a encore démontré une efficacité avérée [8].

Un polystyrène qui semble résister aux enzymes

Avec une production d'environ 20 millions de tonnes par an [9], le polystyrène est l'un des plastiques les plus utilisés. Il possède une vaste gamme d'application, allant des matériaux d'isolation phonique et thermique aux emballages alimentaires. Quelques études montrent l'action de micro-organismes sur le polystyrène, tels que les micro-organismes intestinaux du ver de farine, ainsi que l'action de bactéries, champignons et enzymes, mais souvent sans preuves expérimentales convaincantes [6]. Parmi les résultats les plus prometteurs, Du *et coll.* ont réussi à réduire la masse molaire du polystyrène d'environ 30 % grâce à une peroxydase décolorante en présence de H_2O_2 (figure 1) [10]. Toutefois, le polystyrène a préalablement dû subir une étape d'oxydation pour permettre sa dégradation enzymatique.

Déverrouiller le surcyclage enzymatique du polystyrène

Élaboration de la stratégie : rendre le polystyrène plus accessible à un système enzymatique

Durant mon postdoctorat au Laboratoire de Chimie des Polymères Organiques (LCPO, Université de Bordeaux – CNRS – Bordeaux INP) entre mai 2023 et décembre 2025, je me suis intéressée à la mise au point d'une stratégie pour débloquer la dégradation enzymatique du polystyrène. Encadrée par le Professeur Daniel Taton (LCPO), expert en chimie des polymères, nous avons travaillé en collaboration avec le Dr. Bastien Bissaro, spécialiste des enzymes fongiques au Laboratoire Biodiversité et Biotechnologiques Fongiques (BBF, Aix-Marseille Université – INRAE), afin de développer un projet interdisciplinaire [11].

Dans les travaux antérieurs, le polystyrène – comme d'autres polymères vinyliques – est généralement étudié sous forme de poudre, de films ou dissous dans un solvant organique [6, 10]. Ces conditions limitent l'interaction de ces matériaux hautement hydrophobes avec des enzymes, qui opèrent le plus souvent en milieu aqueux. Partant de l'hypothèse que la faible accessibilité du polystyrène constitue le principal frein à sa dégradation enzymatique, nous avons développé une double stratégie pour favoriser son interaction avec un système enzymatique. Pour cela, nous avons d'un côté dispersé le polystyrène dans l'eau sous forme de nanoparticules, c'est-à-dire sous forme de latex colloïdalement stable à l'aide d'un tensioactif, le dodécylsulfate de sodium (SDS) (figure 2).

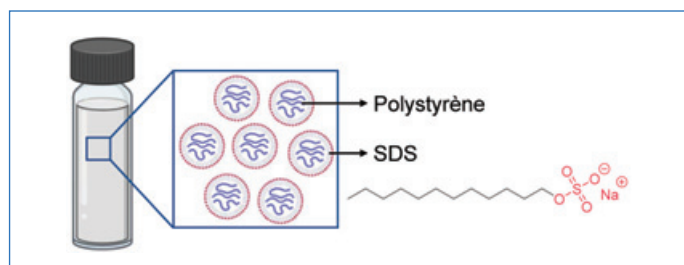


Figure 2 - Latex de polystyrène stabilisé à l'aide du tensioactif SDS.

D'un autre côté, nous avons sélectionné un système enzymatique avec un haut potentiel d'oxydation afin de pouvoir oxyder les liaisons C-H et C-C du polystyrène : le système laccase-médiateur. Les laccases sont des oxydases déjà impliquées dans les systèmes naturels pour la dégradation

de biopolymères récalcitrants comme la lignine, un des principaux constituants du bois. En raison du caractère polymère du substrat et de son potentiel d'oxydation élevé, le mécanisme de dégradation repose généralement sur l'oxydation préalable d'une petite molécule par la laccase, laquelle agit ensuite comme médiateur redox pour l'oxydation du substrat polymère (figure 3).

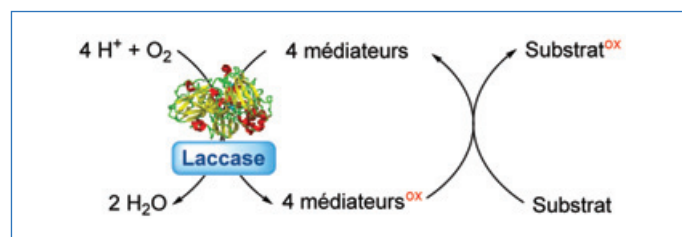


Figure 3 - Mécanisme d'oxydation d'un substrat par le système laccase-médiateur.

Preuves de concept et premières performances sur un latex de polystyrène synthétisé en émulsion

Comme preuve de concept, nous avons tout d'abord synthétisé un polystyrène directement en émulsion par polymérisation radicalaire libre (FRP) en présence de SDS. Cette approche, classique en chimie des polymères, est largement utilisée pour la synthèse industrielle de latex polymères, lesquels trouvent de nombreuses applications dans le domaine des revêtements, notamment les peintures et les adhésifs. Le latex de polystyrène a ensuite été incubé en présence de la laccase commerciale de *Trametes versicolor* et du médiateur 1-hydroxybenzotriazole (HBT) pendant 48 h à 40 °C sous atmosphère d'air, ce qui a conduit à une diminution de la masse molaire au pic (M_p) du PS de 97 % telle que déterminée par chromatographie d'exclusion stérique (figure 4).

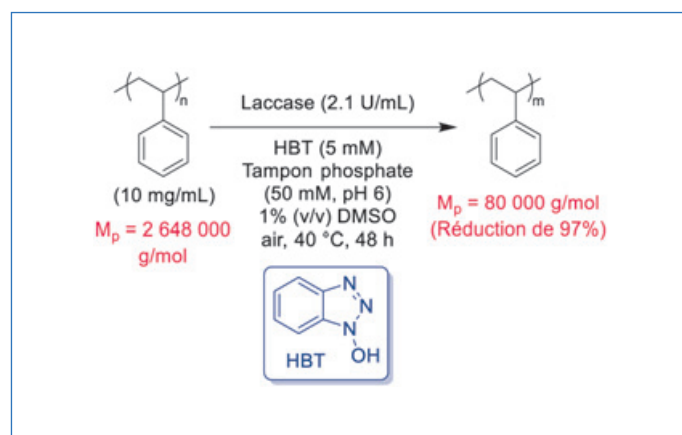


Figure 4 - Dégradation d'un latex de polystyrène synthétisé en émulsion par le système laccase-HBT.

Par comparaison, aucune dégradation n'a été observée avec du PS sous la forme de poudre, film ou dissous dans un solvant organique d'un système biphasique eau/solvant organique. Cela souligne que la forme latex du PS débloque sa dégradation enzymatique en présence du système laccase-médiateur. Afin d'améliorer le procédé, de nombreux paramètres de la réaction ont été étudiés, comme la cinétique, la concentration en PS, laccase et HBT, la disponibilité en O_2 , ou encore le pH. Des additions répétées en laccase et HBT se sont révélées le plus efficace, permettant une diminution de la masse molaire (M_p) du PS de $2\,648\,000\text{ g}\cdot\text{mol}^{-1}$ à $28\,000\text{ g}\cdot\text{mol}^{-1}$, soit une réduction de 99 %.

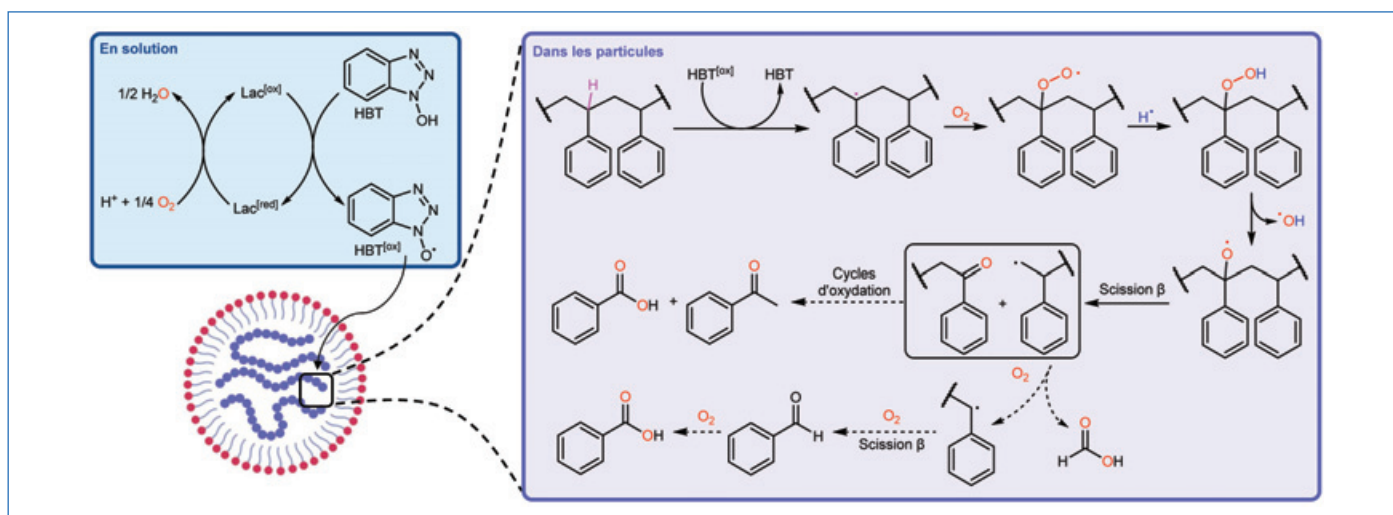


Figure 5 - Mécanisme de surcyclage d'un latex de polystyrène par le système laccase-HBT.

Du déchet au latex : dégradation de polystyrènes postdispersés

Une fois la preuve de concept établie, nous avons étudié si du polystyrène commercial ainsi que des déchets de PS expansé pouvaient être enzymatiquement dégradés *via* leur transformation en latex par postdispersion dans l'eau. Pour cela, les latex de PS ont été préparés par la méthode d'émulsification – évaporation du solvant : les polystyrènes ont été dissous dans le dichlorométhane, puis cette phase organique a été émulsifiée dans une phase aqueuse contenant le tensioactif SDS, avant que l'évaporation du dichlorométhane ne conduise à la formation de nanoparticules de polystyrène stabilisées en solution aqueuse. Des additions répétées du système enzymatique (laccase + HBT) ont conduit aux meilleurs taux de dégradation, avec une diminution du M_p du PS commercial et des déchets de PS expansé d'environ 65-70 %.

De la dégradation à la valorisation : vers la formation de produits à fortes valeurs ajoutées

Outre l'obtention de taux de dégradation du PS par voie enzymatique sans précédents, la formation de molécules à haute valeur ajoutée (acide benzoïque, benzaldéhyde, acétophénone) a également été observée. Sur le plan mécanistique, le procédé repose sur un transfert d'atome d'hydrogène (HAT) en présence de dioxygène. Plus précisément, la laccase, présente en phase aqueuse, oxyde le HBT en son radical nitroxy (*figure 5*). Après diffusion dans les nanoparticules de PS, le radical HBT oxyde les chaînes de polystyrène. Le radical de PS ainsi formé peut ensuite réagir avec le dioxygène de l'air, entraînant une scission bêta du polystyrène. Enfin, plusieurs cycles de réactions avec le dioxygène et de scissions bêta conduisent à la formation de l'acide benzoïque, du benzaldéhyde et de l'acétophénone.

Bien que les rendements en ces composés, de l'ordre de quelques pourcents, restent à ce stade modestes, ils présentent un intérêt majeur pour la chimie industrielle. Le benzaldéhyde est notamment employé comme arôme en raison de sa note d'amande, l'acide benzoïque comme agent antifongique et antibactérien, et l'acétophénone comme agent odorant, intermédiaire de synthèse ou solvant.

Une demande de brevet protégeant le procédé de dispersion du polystyrène et la méthode associée de valorisation par voie enzymatique a été déposée [12], et les résultats de cette

collaboration interdisciplinaire ont été publiés dans la revue *Angewandte Chemie* [11]. Le développement du procédé se poursuit actuellement, tant pour en améliorer l'efficacité que pour l'étendre au surcyclage d'autres polymères vinyliques. Bien que cette approche soit encore éloignée d'une application industrielle, ces résultats inédits laissent entrevoir un avenir dans lequel les déchets plastiques pourraient être transformés en composés d'intérêt, tels que des arômes ou des principes actifs pharmaceutiques.

Manon Pujol remercie les personnes impliquées dans ce travail, Daniel Taton et Bastien Bissaro.

- [1] R. Geyer, J.R. Jambeck, K.L. Law, Production, use, and fate of all plastics ever made, *Sci. Adv.*, **2017**, 3(7), <https://doi.org/10.1126/sciadv.1700782>
- [2] European Parliament, Plastic waste and recycling in the EU: facts and figures, *Renewable Carbon News*, <https://renewable-carbon.eu/news/plastic-waste-and-recycling-in-the-eu-facts-and-figures>, consulté le 14/01/26.
- [3] Z.O.G. Schyns, M.P. Shaver, Mechanical recycling of packaging plastics: a review, *Macromol. Rapid Commun.*, **2021**, 42, 2000415, <https://doi.org/10.1002/marc.202000415>
- [4] R.-X. Yang, K. Jan, C.-T. Chen, W.-T. Chen, K.C.-W. Wu, Thermochemical conversion of plastic waste into fuels, chemicals, and value-added materials: a critical review and outlooks, *ChemSusChem*, **2022**, 15, e202200171, <https://doi.org/10.1002/cssc.202200171>
- [5] S. Oh, E.E. Stache, Recent advances in oxidative degradation of plastics, *Chem. Soc. Rev.*, **2024**, 53, p. 7309-27, <https://doi.org/10.1039/D4CS00407H>
- [6] V. Tournier *et al.*, Enzymes' power for plastics degradation, *Chem. Rev.*, **2023**, 123, p. 5612-701, <https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.2c00644>
- [7] V. Tournier *et al.*, An engineered PET depolymerase to break down and recycle plastic bottles, *Nature*, **2020**, 580, p. 216-19, <https://doi.org/10.1038/s41586-020-2149-4>
- [8] A.A. Stepnov *et al.*, Revisiting the activity of two poly(vinyl chloride) and polyethylene-degrading enzymes, *Nat. Commun.*, **2024**, 15, 8501, <https://doi.org/10.1038/s41467-024-52665-z>
- [9] Plastics Europe, *Plastics – the fast Facts 2023*, **2023**, <https://plasticseurope.org/knowledge-hub/plastics-the-fast-facts-2023>, consulté le 14/01/26.
- [10] Y. Du *et al.*, Oxidative degradation of pre-oxidated polystyrene plastics by dye decolorizing peroxidases from *Thermomonospora Curvata* and *Nostocaceae*, *J. Hazard. Mater.*, **2022**, 436, 129265, <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2022.129265>
- [11] M. Pujol *et al.*, Harnessing colloidal dispersion for laccase-driven enzymatic depolymerization of polystyrene, *Angew. Chem. Int. Ed. Engl.*, **2026**, 65, e13937, <https://doi.org/10.1002/anie.202513937>
- [12] M. Pujol *et al.*, *Method for degrading a vinyl polymer*, Patent n° PCT/EP2025/082415, 10/11/2025.

Manon PUJOL* est postdoctorante au LCPO (CNRS, Université de Bordeaux, Bordeaux INP). Elle est lauréate du Prix Jeunes Talents France L'Oréal-UNESCO *Pour les Femmes et la Science* 2025.

*manon.pujol@bordeaux-inp.fr.



Du défaut à la fonction : capteurs 2D sélectifs par fonctionnalisation

Des défauts réactifs pour une haute sensibilité et une sélectivité programmée par reconnaissance supramoléculaire

Anna ZHURAVLOVA

Résumé Cet article montre comment transformer les défauts intrinsèques du MoS₂ bidimensionnel en atouts fonctionnels pour la détection chimique. Les lacunes de soufre sont exploitées comme sites d'ancrage pour greffer un récepteur terpyridine sélectif, tandis qu'un réseau interconnecté de nanofeuillets amplifie la transduction électrique. Le capteur impédimétrique obtenu permet une détection sélective des ions Co²⁺ en milieu aqueux jusqu'à 1 pM, sur une large gamme de concentrations, ouvrant la voie à des réseaux 2D réactifs et modulaires.

Mots-clés Disulfure de molybdène, matériaux 2D, ingénierie des défauts, fonctionnalisation covalente, reconnaissance supramoléculaire, capteur impédimétrique, détection d'ions métalliques.

Abstract From defects to function: selective sensors with functionalized 2D materials

This article shows how intrinsic defects in 2D MoS₂ can be turned into functional features for chemical sensing. Sulfur vacancies are used as anchoring sites for a selective terpyridine receptor, while an interconnected nanosheet network amplifies electrical transduction. The resulting impedimetric sensor enables highly selective Co²⁺ detection in water down to 1 pM over a broad concentration range, opening the way to modular and reactive 2D sensing networks.

Keywords Molybdenum disulfide, 2D materials, defect engineering, covalent functionalization, supramolecular recognition, impedimetric sensing, metal ion sensing.

<https://doi.org/10.63133/scf.act-chim.2026.512.08>

Les encres de matériaux bidimensionnels (2D) permettent de fabriquer des films minces pour la détection chimique, mais leurs performances restent limitées par une sélectivité souvent faible (les surfaces répondant à de nombreux analytes) et par une conduction dominée par la résistance inter-feuillets, qui peut masquer la réponse de la surface active et réduire la transduction. Nous proposons d'inverser ces contraintes en exploitant les lacunes de soufre de MoS₂ bidimensionnel comme sites d'ancrage pour greffer un récepteur ionique sélectif et construire un réseau interconnecté de nanofeuillets reliés bord à bord, convertissant la reconnaissance supramoléculaire en signal électrique. La sensibilité est amplifiée par la contribution des jonctions inter-feuillets, tandis que la lecture par impédance fournit une signature robuste et linéaire. Cette approche conduit à une détection sélective des ions Co²⁺ en milieu aqueux jusqu'à 1 pM sur une large gamme de concentrations (de 1 pM à 1 μM), et ouvre la voie à des réseaux 2D (multi)réactifs.

Matériaux 2D pour la détection chimique

Capteurs chimiques

La détection chimique en conditions réelles impose un compromis difficile : atteindre une haute sensibilité tout en conservant une sélectivité suffisante face aux espèces interférentes présentes dans des matrices complexes. Au-delà de la performance analytique, un capteur doit aussi offrir une réponse robuste et reproductible, compatible avec des mesures rapides et, idéalement, des dispositifs miniaturisés. Dans ce contexte, associer une reconnaissance (supra)moléculaire bien définie à une transduction électrique simple reste une approche particulièrement efficace pour convertir une interaction ciblée en signal exploitable [1].

Matériaux bidimensionnels traités en solution

Les matériaux bidimensionnels offrent une plateforme particulièrement attractive pour la détection chimique grâce à leur grande surface accessible, à des réponses électroniques sensibles à l'environnement et à leur compatibilité avec des dispositifs miniaturisés [2]. Leur mise en œuvre en solution permet de formuler des encres et de fabriquer, à grande échelle, des films minces par dépôt ou impression sur des substrats variés [3]. Parmi ces matériaux 2D, les dichalcogénures de métaux de transition (TMD 2D) se distinguent par la diversité de leurs propriétés électriques et optiques modulables. Ils constituent des candidats de choix pour des capteurs imprimables ainsi que pour des applications en énergie et en (opto)électronique [4].

Cependant, les films imprimés à base de TMD 2D rencontrent deux défis majeurs limitant leurs performances électriques. Le premier concerne la haute densité de défauts structuraux, notamment les lacunes en soufre dans le disulfure de molybdène (MoS₂), induite par les méthodes d'exfoliation. Ces défauts altèrent les propriétés électroniques du matériau et perturbent le transport des charges dans le nanofeuillet. Le second défi concerne la mauvaise connexion électrique entre les nanofeuillets du film imprimé. La résistance inter-feuillets, bien supérieure à la résistance intra-feuillet, limite fortement le transport des charges dans le film [5].

Les imperfections au service de la performance

Le concept

Plutôt que de chercher à effacer ces imperfections intrinsèques, nous proposons de les intégrer à la conception du matériau et d'en faire des leviers fonctionnels. L'idée directrice est simple : utiliser les défauts pour programmer

la reconnaissance, et exploiter les jonctions inter-feuillets comme zones d'amplification de la transduction. Par exemple, les lacunes de soufre de MoS₂ constituent en effet des sites réactifs qui servent de points d'ancrage pour une fonctionnalisation covalente avec des molécules thiolées [6]. Quand un film non fonctionnalisé répond de façon largement non spécifique, la greffe d'un récepteur permet au contraire de définir la sélectivité, en imposant une reconnaissance gouvernée par la structure du ligand.

Dans un film percolant, constitué de nombreux nanofeuillets, le transport est fréquemment dominé par les jonctions entre feuillets. Une modification, même locale, de la barrière de charge à ces jonctions peut alors produire une variation mesurable de la résistance globale [7]. En ciblant précisément ces interfaces par la chimie, par des ponts moléculaires fonctionnels (motifs capables de relier les feuillets), la reconnaissance agit là où le réseau est le plus sensible, ce qui renforce la réponse et améliore la reproductibilité.

Concrètement, cette approche a été mise en œuvre de la façon suivante : MoS₂ a d'abord été exfolié en phase liquide afin d'obtenir une encre de nanofeuillets riche en lacunes de soufre [5], puis ces lacunes ont été utilisées comme points d'ancrage pour greffer de façon covalente un récepteur thiolé portant le motif terpyridine. L'interconnexion a été renforcée en utilisant un cation structurant qui coordonne deux motifs terpyridiniques et crée un pont de coordination entre nanofeuillets. Ce film fonctionnalisé a été assemblé entre deux électrodes, de manière à former un réseau percolant. Comme le transport est dominé par les jonctions, la coordination modifie fortement la résistance du film. Enfin, la réponse électrique du dispositif a été suivie par spectroscopie d'impédance, afin d'associer l'événement de coordination du Co²⁺ à une signature électrique calibrable. Le choix du motif terpyridine est motivé par sa chimie de coordination : ligand tridentate, il impose une interaction directionnelle et compétitive en solution, susceptible de discriminer des cations spécifiques [8]. Le Co²⁺ a été retenu comme analyte modèle en raison de sa coordination favorable avec la terpyridine, mais aussi de l'intérêt de sa détection à l'état de traces en milieu aqueux [9]. Dans un réseau interconnecté, cette reconnaissance structurée a un effet particulièrement marqué lorsqu'elle perturbe les interfaces inter-feuillets. Le capteur ne réagit donc pas à toutes les espèces adsorbées : il traduit préférentiellement un événement de coordination en variation électrique.

Contrôler l'assemblage, pas seulement la chimie : la fabrication microfluidique « pas à pas »

Un capteur performant n'est pas uniquement une question de bon ligand. Dans les réseaux 2D traités en solution, la réponse électrique dépend tout autant de la microarchitecture du film, en particulier de la couverture réelle entre les électrodes, de l'homogénéité, et de l'accessibilité des sites réactifs. Les dépôts « classiques » (par goutte, centrifugation, pulvérisation, etc.) conduisent facilement à des films épais, des agrégats et une couverture inégale, ce qui brouille l'interprétation, atténue la réponse et réduit la reproductibilité. C'est précisément pour sortir de ce régime « morphologie subie » que nous avons recours à une stratégie microfluidique séquentielle, conçue comme un procédé d'assemblage contrôlé, reposant sur un dépôt séquentiel de l'encre de MoS₂ et une réticulation chimique des nanofeuillets *in situ* [10,11]. Cette méthode permet d'obtenir des films minces, ordonnés et majoritairement monofeuillets.

Détection picomolaire de Co²⁺ et sélectivité en conditions pertinentes

Le film ainsi obtenu est intégré dans un dispositif de détection de type chimiorésistor, c'est-à-dire un capteur dont le signal est la variation de résistance électrique du matériau lorsqu'il interagit avec l'analyte. Dans cette architecture, l'interaction analyte-récepteur se traduit principalement par une modification des barrières de transport électrique entre les nanofeuillets, ce qui induit une variation de la résistance (figure 1a). Une lecture en courant continu peut déjà révéler une variation de conductance, mais la spectroscopie d'impédance, fondée sur l'application d'un faible signal électrique alternatif et l'analyse de la réponse du matériau en fonction de la fréquence, apporte une sensibilité accrue et une signature plus riche des processus interfaciaux (figure 1b).

Le film de MoS₂ fonctionnalisé par terpyridine présente une réponse fortement dépendante de la concentration en Co²⁺ en milieu aqueux [10]. Le chimiorésistor à base du film mince fonctionnalisé a permis de détecter sélectivement les ions Co²⁺ dans l'eau avec une sensibilité exceptionnelle de 0,31 log₁₀([Co²⁺])⁻¹, surpassant les performances du matériau vierge (peu sensible) et des autres capteurs à lecture électrique. Ce capteur impédimétrique a démontré une limite de détection ultra-faible de 1 pM, une réponse linéaire en fonction du logarithme de la concentration sur une large gamme

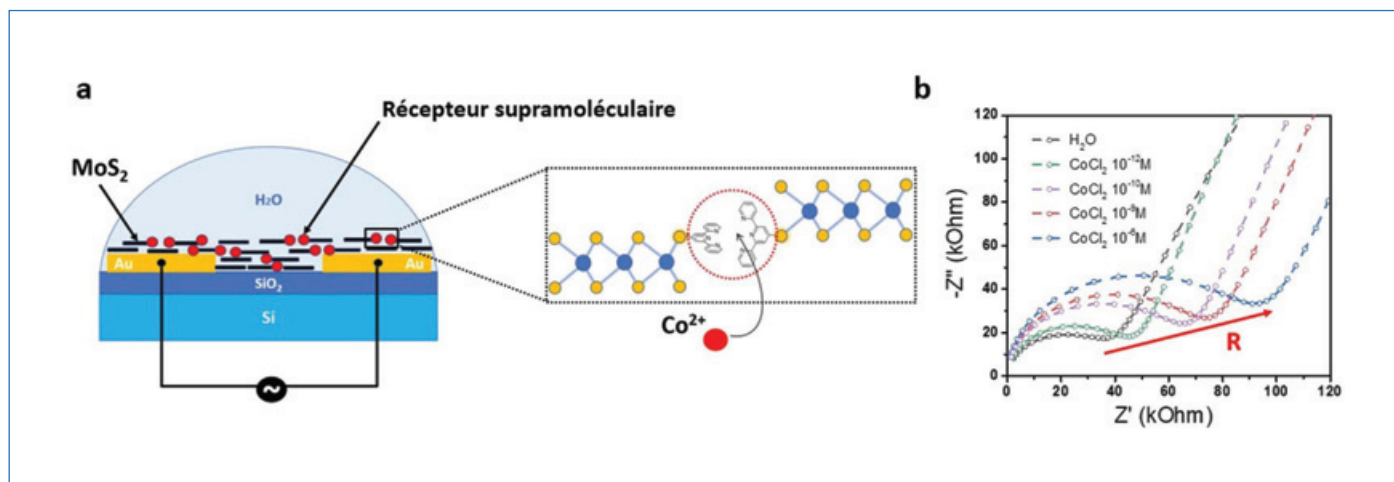


Figure 1 - a) Architecture du capteur impédimétrique ; b) Réponse du capteur montrant une augmentation de la résistance (R) en fonction de la concentration en ions Co²⁺. Adapté de la réf. [10], sous licence CC BY-4.0.

de concentrations (1 pM à 1 μ M) et une sélectivité élevée envers les ions Co^{2+} par rapport aux cations interférents dans l'eau du robinet.

Enfin, la réversibilité de la coordination rend possible la régénération du capteur, un point important pour des dispositifs réutilisables, même si la maîtrise des dérives au fil des cycles demeure un axe naturel d'optimisation.

Vers des réseaux 2D réactifs

Enfin, cette stratégie d'assemblage séquentiel du film fonctionnel ne se limite pas aux ions de métaux lourds ni à un seul analyte. Le concept est généralisable, car il repose sur une approche modulaire : le réseau de nanofeuillets 2D constitue la plateforme de transduction, tandis que la sélectivité est déterminée par la nature du récepteur greffé. En remplaçant ce motif par un ligand adapté, il devient possible de cibler un large éventail d'analytes, allant des petits ions aux molécules (bio)organiques. Cette approche constitue ainsi une plateforme solide pour le développement de capteurs portables de nouvelle génération, à la fois évolutifs, peu coûteux et compatibles avec des procédés de fabrication à grande échelle. Plus généralement, ce travail illustre comment la chimie de fonctionnalisation peut transformer un réseau de nanofeuillets 2D traité en solution en un matériau de détection à hautes performances.

Anna Zhuravlova remercie le Dr. Antonio Gaetano Ricciardulli et le Prof. Paolo Samorì pour leur encadrement scientifique, leurs conseils et leurs discussions tout au long de cette étude, ainsi que les Dr. Dawid Pakulski, Adam Gorczyński, Adam Kelly, le Pr. Jonathan N. Coleman et le Dr. Artur Ciesielski pour leurs contributions à cette étude. Elle remercie également le Pr. Thomas Hermans pour la mise à disposition de la chambre microfluidique utilisée dans ce travail.

- [1] R. Furlan de Oliveira, V. Montes-García, A. Ciesielski, P. Samorì, Harnessing selectivity in chemical sensing via supramolecular interactions: from functionalization of nanomaterials to device applications, *Mater. Horiz.*, **2021**, *8*, p. 2685-708, <https://doi.org/10.1039/D1MH01117K>
- [2] C. Anichini *et al.*, Chemical sensing with 2D materials, *Chem. Soc. Rev.*, **2018**, *47*, p. 4860-908, <https://doi.org/10.1039/C8CS00417J>
- [3] J.N. Coleman *et al.*, Two-dimensional nanosheets produced by liquid exfoliation of layered materials, *Science*, **2011**, *331*, p. 568-71, <https://doi.org/10.1126/science.1194975>
- [4] Y. Jeong, P. Samorì, Functionalized 2D transition metal dichalcogenide inks via liquid-phase exfoliation for practical applications, *Bull. Korean Chem. Soc.*, **2024**, *45*, p. 110-24, <https://doi.org/10.1002/bkcs.12807>
- [5] S. Ippolito *et al.*, Covalently interconnected transition metal dichalcogenide networks via defect engineering for high-performance electronic devices, *Nat. Nanotechnol.*, **2021**, *16*, p. 592-8, <https://doi.org/10.1038/s41565-021-00857-9>
- [6] S. Bertolazzi *et al.*, Engineering chemically active defects in monolayer MoS_2 transistors via ion-beam irradiation and their healing via vapor deposition of alkanethiols, *Adv. Mater.*, **2017**, *29*, 1606760, <https://doi.org/10.1002/adma.201606760>
- [7] S. Ippolito *et al.*, Unveiling charge-transport mechanisms in electronic devices based on defect-engineered MoS_2 covalent networks, *Adv. Mater.*, **2023**, *35*, 2211157, <https://doi.org/10.1002/adma.202211157>
- [8] U. S. Schubert, H. Hofmeier, George R. Newkome, *Modern Terpyridine Chemistry*, Wiley-VCH, **2006**.
- [9] S. Okamoto, L.D. Eltis, The biological occurrence and trafficking of cobalt, *Metallomics*, **2011**, *3*, p. 963-70, <https://doi.org/10.1039/c1mt00056j>
- [10] A. Zhuravlova *et al.*, High selectivity and sensitivity in chemiresistive sensing of Co(II) ions with liquid-phase exfoliated functionalized MoS_2 : a supramolecular approach, *Small*, **2023**, *19*, 2208100, <https://doi.org/10.1002/sml.202208100>
- [11] A.G. Ricciardulli *et al.*, Defect-engineering of liquid-phase exfoliated 2D semiconductors: stepwise covalent growth of electronic lateral hetero-networks, *Mater. Horiz.*, **2024**, *11*, p. 5614-21, <https://doi.org/10.1039/D4MH00882K>

Anna ZHURAVLOVA* est postdoctorante à l'Université de Strasbourg. Elle est lauréate du Prix Jeunes Talents France L'Oréal-UNESCO Pour les Femmes et la Science 2025.

* azhuravlova@unistra.fr

45
Sc
21

**Culture
sciencesChimie**


ENS


MINISTÈRE
DE L'ÉDUCATION
NATIONALE DE
L'ENSEIGNEMENT
SUPÉRIEUR ET DE
LA RECHERCHE



Site de ressources en Chimie pour les enseignants

Thèmes en lien avec les
**PROGRAMMES
D'ENSEIGNEMENT**

Contenu validé par des
CHERCHEURS

Articles, Vidéos, Diaporamas

AGENDA, ACTUALITÉS
événements, conférences, parutions
scientifiques...

<http://culturesciences.chimie.ens.fr>





Hommage à Andrée Marquet

Le 12 février 2026, la communauté des chimistes apprenait avec une immense tristesse la disparition d'Andrée Marquet. Avec elle, s'éteint une personnalité remarquable et une pionnière reconnue de la chimie bioorganique et de la chimie biologique [1]. Son parcours exemplaire et inspirant aura marqué durablement cette discipline aujourd'hui entrée dans sa phase de pleine maturité. Au-delà de la scientifique d'exception, elle laisse aujourd'hui un grand vide et plusieurs familles en deuil. Au premier plan, celle de ses proches à qui vont nos pensées les plus sincères. Celle de ses collègues et collaborateurs qui ont partagé des aventures scientifiques passionnantes durant de nombreuses années à ses côtés. Celle de ses anciens élèves à qui elle a transmis avec rigueur un savoir inestimable, un patrimoine de connaissances et un regard nouveau sur la chimie organique. Enfin, celle de la danse, qu'elle affectionnait tant. Elle y avait trouvé une manière de transmettre au-delà des horizons académiques et d'exprimer sa passion pour la chimie à travers un langage artistique.

Sa vie ressemble, comme l'a bien décrit sa famille, à une belle histoire qu'Andrée a menée librement et comme elle l'a toujours choisie depuis ses débuts et jusqu'à ses derniers jours. Issue d'un milieu modeste, très jeune, elle est repérée à l'école par son instituteur qui entrevoit déjà pour elle un bel avenir. Elle aimait raconter avec malice qu'elle ne pouvait pas prétendre à l'École normale d'instituteurs à laquelle on destinait les bons élèves, à cause de résultats insuffisants en chant. Andrée ira donc au lycée à Dijon, puis à Paris où elle préparera le concours de l'École nationale supérieure de Chimie de Paris, brillamment réussi malgré des conditions d'études rudimentaires.

Ingénieure diplômée en 1956, elle devient stagiaire de recherche au CNRS et entame une thèse de doctorat au Collège de France dans le laboratoire de Chimie organique des Hormones d'Alain Horeau sous la direction de Jean Jacques, dont elle dira qu'il fut la personne qui l'a le plus influencée pendant sa vie professionnelle. Elle obtient un doctorat en 1961 sur les halogénations sélectives par les perhalogénures d'ammonium quaternaires.

Elle effectue ensuite un stage postdoctoral à l'ETH de Zurich dans le laboratoire de Duilio Arigoni qui s'intéresse à la biosynthèse de substances naturelles. Ce pionnier reconnu internationalement pour ses travaux en chimie bioorganique aura eu une profonde influence sur les projets futurs d'Andrée. Ce séjour inspirant et les liens qu'elle a gardés toute sa vie avec D. Arigoni ont durablement forgé une passion pour les voies de biosynthèse et l'élucidation de mécanismes enzymatiques subtils et complexes en utilisant des connaissances fondamentales en chimie organique. Les enseignements d'Andrée seront par la suite nourris d'histoires fascinantes de marquage isotopique et des travaux d'orfèvre de D. Arigoni sur le méthyle chiral qui marqueront des générations d'étudiants.

Revenue en France, elle a d'abord été chercheuse au CNRS au Collège de France, puis à Thiais au Centre d'études et de recherche de chimie organique appliquée. En 1978, elle devient professeure à l'Université Pierre et Marie Curie (UPMC) où elle fonde le Laboratoire de Chimie Organique Biologique. Tout en s'appuyant sur ses connaissances

mécanistiques de la chimie organique, elle essaie de comprendre comment les enzymes peuvent réaliser des réactions incroyables que le chimiste aurait eu bien du mal à imaginer. Pour autant, les chimistes organiciens munis d'un solide bagage en chimie mécanistique étaient les mieux armés pour étudier ces réactions complexes, et c'est cette force qu'a su exploiter Andrée dans ses travaux. Suite à un travail méthodologique mécanistique fondamental mettant en jeu des carbanions stabilisés par le soufre [2], ses travaux sont appliqués à la synthèse totale de la biotine (vitamine H) [3], qui l'accompagnera toute sa carrière dans un travail d'enzymologie mécanistique de longue haleine. Cette molécule possède en effet une voie de biosynthèse extrêmement complexe qui pose de nombreuses questions, dont celle de l'origine du soufre et du mécanisme de formation du cycle contenant le lien thioéther qu'elle déchiffra après de longues années d'études [4]. Elle s'intéressa également entre autres à des réactions associées à de nombreuses vitamines et cofacteurs, dont la vitamine K et les stéroïdes, ainsi qu'à la recherche d'inhibiteurs de certaines de ces voies de biosynthèse.



Andrée Marquet (1934-2026).

Andrée Marquet devient très tôt l'une des pionnières de la chimie bioorganique en France et son action a été déterminante pour le développement et la structuration de cette interface, que ce soit au niveau de

la formation, de la mise en place de réseaux, mais également au niveau institutionnel. Comme le définit clairement Solange Lavielle, « *La chimie bioorganique tente de répondre à des questions qui relèvent des sciences du vivant en élargissant des concepts et en utilisant des techniques qui relèvent de la chimie. Cette démarche d'interface impose aux chimistes bioorganiciens une formation pluridisciplinaire qui au fil des ans s'est développée dans les universités françaises, Andrée Marquet a largement contribué à la mise en place de cet enseignement universitaire.* » Dans le cadre d'un numéro spécial de *L'Actualité Chimique* consacré à la chémobiologie, domaine en filiation directe avec la chimie bioorganique, Andrée a pris plaisir à nous raconter, dans un entretien en 2021 avec son ami Francis Schuber, les débuts de cette interface en France grâce au développement

des contacts internationaux et des expériences postdoctorales dans les laboratoires suisses et anglo-saxons en pointe dans ce domaine [5]. Elle a fait partie de ces chercheurs qui, à leur retour de postdoc, ont su faire preuve d'audace et créer leur propre thématique aux interfaces malgré de nombreuses contraintes, critiques ou mauvaise compréhension liées à la nouveauté de ses travaux et à l'absence de contours disciplinaires précis qui dérange parfois. Elle a ainsi ouvert une voie nouvelle et transmis à son tour, formant une génération de scientifiques qui ont poursuivi cette approche interdisciplinaire. Avec d'autres, elle a été à l'origine de la structuration d'une communauté en France et sont nées les RECOB (Rencontres de Chimie Organique Biologique). La première réunion, dont le format et l'esprit ont pris modèle sur les « Gordon Research Conferences », a eu lieu à Aussois en 1986. Une nouvelle communauté s'est ainsi constituée et a pris aujourd'hui une ampleur considérable avec l'essor de la chimie bioorthogonale et de la « *chemical biology* ». Les chercheurs de cette communauté continuent à se réunir tous les deux ans à Aussois dans un état d'esprit convivial.

Avec d'autres également, dont son ami Pierre Potier, elle a largement défendu cette vision de l'interface chimie-biologie auprès des institutions afin de proposer des programmes scientifiques dédiés, de décloisonner les disciplines pour dépasser les frontières associées aux approches strictement disciplinaires. Comme elle l'indique avec lucidité : « *Dans les diverses institutions, le mot interdisciplinarité est un bel étendard mais la réalité ne suit pas toujours.* » Il est vrai qu'à chaque changement d'orientation politique de la recherche, ce combat devait et doit encore toujours être mené pour convaincre que l'innovation naît souvent là où les savoirs se rencontrent.

C'est avec cette conviction qu'Andrée a mis en place à l'UPMC un parcours d'interface permettant d'accéder à un savoir solide en biologie et en chimie organique. Pour nombre d'étudiants, les cours de chimie bioorganique dispensés par Andrée ont été une véritable révélation. Elle avait cette capacité hors du commun d'expliquer des notions très complexes d'une façon simple et limpide. Suivre ses cours était donc très valorisant car on accédait à des connaissances très subtiles en ayant l'impression de faire peu d'effort puisqu'elle nous hissait jusqu'à elles. Il ne s'agissait pas de vulgariser les notions, mais de les dire avec des mots simples. Ses enseignements étaient uniques également car ils rassemblaient les mécanismes de la chimie organique classique avec la chimie du vivant. Tout ce qui manquait à la biochimie, à savoir l'aspect réactivité et mécanistique des réactions du vivant, et ce qui manquait à la chimie organique, à savoir l'application aux problématiques biologiques, elle l'a réuni avec talent dans un cours captivant et sans équivalent alors. Grâce à ce cours, des boîtes noires de la biochimie s'éclairaient soudainement, et la chimie organique prenait une dimension nouvelle bien au-delà de ce qui était enseigné dans des cours classiques. Elle permettait de comprendre ce que l'on pouvait faire de nos connaissances en chimie organique au-delà de la synthèse de nouvelles molécules, comprendre des processus biologiques, en découvrir de nouveaux, interférer sur des cibles impliquées dans des pathologies. Andrée a ainsi pendant de nombreuses années, comme elle le disait elle-même, enseigné la chimie aux biochimistes et la biochimie aux chimistes, et permis à ces deux communautés d'étudiants de se croiser en cours et au laboratoire, de

s'enrichir mutuellement et d'apprendre à parler un langage commun tout en ayant un bagage de connaissances différent, afin de permettre aux uns d'apporter des idées neuves aux autres pour résoudre leur problématique. Dès que c'était possible, elle mettait en parallèle un réactif employé classiquement en synthèse organique et son mécanisme d'action avec le « réactif » biologique permettant d'effectuer une réaction similaire sur un substrat complexe dans la nature pour finalement nous convaincre que ce qui se passait dans les cellules relevait de principes chimiques familiers. Il est impressionnant aujourd'hui de voir à quel point ce qu'elle a transmis était visionnaire car bon nombre de notions ont été remises au goût du jour au cours de ces dernières années.

Andrée a participé également à de nombreuses instances scientifiques décisionnaires ou consultatives illustrant une forte implication pour le collectif, une voix écoutée dans la communauté et une volonté de porter la chimie à son plus haut niveau en questionnant aussi les dimensions éthiques.

Sa préoccupation d'entretenir une bonne relation et une bonne communication entre chimistes et citoyens constitue une facette importante de sa carrière. Pour elle, il est indispensable de « *contribuer à la formation de citoyens responsables, intégrant dans leur culture la dimension scientifique* » [7]. Alors qu'elle était en poste au ministère, Andrée a coordonné les actions de l'Année de la chimie 1999 [8]. À cette occasion, elle a constitué un réseau de chimistes qui ont proposé des actions dans toutes les régions de France. À l'issue de cet événement, elle a souhaité pérenniser ce réseau et, avec le soutien de Pierre Potier, alors Président de la Fondation de la Maison de la chimie, elle a fondé en 2001 la commission Chimie et Société [9] qu'elle a présidée jusqu'à fin 2011, une autre Année internationale de la chimie.

Sa volonté était que cette commission analyse l'origine de l'incompréhension qui s'est développée entre chimistes et citoyens et apporte sa contribution à la recherche de solutions permettant au public de comprendre la chimie et son rôle au quotidien. « *Comment pouvons-nous expliquer simplement ce qu'est une molécule et pourquoi il est important de bien le comprendre ?* », disait-elle. Ainsi, elle a mis en place trois volets d'actions : des colloques pour réfléchir sur la manière de transmettre [10], des articles thématiques pour réunir les données scientifiques autour de questions sociétales [11,12] et des

Responsabilités institutionnelles

1984-1986 : Présidente de la division Chimie organique de la Société Chimique de France

1987-1991 : Présidente de la Société franco-japonaise de chimie fine et thérapeutique

1991-1995 : Présidente de la section 20 du comité national du CNRS

1993 : Élu membre correspondante de l'Académie des sciences

1992-1997 : Membre du Conseil scientifique du CNRS

1998 : Directrice scientifique du département de chimie à la direction de la recherche du ministère de l'Éducation Nationale, de la Recherche et de la Technologie

1999-2003 : Membre du Conseil d'administration du Palais de la découverte

2007-2011 : Membre du Comité d'éthique du CNRS avec la publication en 2009 d'un rapport sur « Le rôle de la communauté scientifique dans le débat sur les substances chimiques » [6].

2001-2011 : Fondatrice et Présidente de la commission Chimie et Société de la Fondation de la Maison de la Chimie

événements grand public mis en place par les correspondants régionaux de Chimie et Société avec analyse de leur perception [13]. Entre autres, à l'occasion de l'Année internationale de la chimie 2011, elle a coordonné une enquête de perception de la chimie dont les résultats ont été rapportés dans un numéro spécial de *L'Actualité Chimique* [14,15]. En 2019, des tables rondes « Naturellement Chimiques » initiées en collaboration avec le Palais de la découverte ont été déclinées en région. Elle a organisé une session Chimie et Société, une première au Congrès international de l'Union internationale de chimie pure et appliquée (IUPAC 2019) à Paris, incluant une table ronde ouverte au public. Elle a soutenu le lancement des rencontres annuelles Chimie & Terroir organisées tour à tour depuis 2008 par les 14 correspondants régionaux de Chimie et Société et y a été actrice à plusieurs reprises [16]. « *Des expériences ludiques, d'accord, mais il faut aussi faire passer de la science !* », avait-elle dit. Andrée souhaitait ainsi réconcilier le grand public avec la chimie qui demeure si souvent mal perçue.

Andrée a aussi magnifiquement exploré la voie de conférences dansées pour transmettre la science chimique. Avec ses amis danseuses et danseurs, leur professeure Michèle Cacouault et l'association Le Creuset, elle a proposé deux formidables spectacles : « *Autour du bisphénol A* » (Chimie & Terroir, Saint-Nazaire, mai 2016) et plus récemment « *Parkinson ou les chemins de la métamorphose* » (Chimie & Terroir, Seyssinet-Pariset, juin 2023 ; théâtre du Centre Paris Anim', janvier 2025 ; Sorbonne Université, avril 2025). Sa dernière prestation combinant cours de chimie sur la dopamine et la maladie de Parkinson et danse a eu lieu au printemps 2025 à Sorbonne Université, organisée avec l'aide de Philippe Karoyan. Elle nous a laissé un souvenir rempli d'émotions et d'admiration par la vivacité d'esprit d'Andrée toujours pétillante, pédagogue et artiste pleine de grâce malgré la maladie.

Les travaux d'Andrée ont été reconnus et récompensés par de nombreux prix et distinctions tout au long de sa carrière soulignant un parcours exemplaire. Pour autant, elle nous a confié plusieurs années après sa retraite que ce qui lui avait donné le plus de satisfaction dans sa carrière, ce n'était finalement pas les avancées scientifiques auxquelles elle avait contribué. Ce qu'elle avait préféré après une vie aussi remplie, c'est de voir s'épanouir les générations de scientifiques qu'elle avait formés. Ce qui lui semblait le plus précieux était la notion de transmission : transmission des connaissances, transmission d'une rigueur scientifique, transmission d'une vision bien particulière de la chimie. Le laboratoire qu'a fondé Andrée, ce sont des générations



Conférence dansée autour de la dopamine.

de chercheurs unis par un lien singulier. Elle fut un mentor pour nombre d'étudiants et jeunes chercheurs avec lesquels elle a su tisser et entretenir des liens forts tout au long de leur carrière, qu'elle soit académique ou industrielle. Et lorsqu'ils se retrouvent, au fil des moments tristes ou heureux qui jalonnent la vie d'un laboratoire, renaît ce sentiment précieux d'appartenir à une même famille, une famille qu'Andrée a su faire naître, rassembler et faire grandir avec le temps.

Andrée était chimiste, mais aussi danseuse, skieuse et passionnée d'ikebana. Elle imposait une rigueur et un travail de réflexion intense pour boucler toute action qu'elle entreprenait au service de la science et de sa diffusion. Nous n'oublierons jamais ses enseignements.

**Dominique Guianvarc'h, Philippe Karoyan,
Lydie Valade et Marie-Claude Vitorge**

Andrée Marquet, in *Comment je suis devenu chimiste*, R.-E. Eastes, E. Kleinpeter (dir.), Éditions Le Cavalier Bleu, 2008.

- [1] J. Apotheker, L. Simon Sarkadi, N.J. Moreau (eds), *European Women in Chemistry*, Wiley, 2011.
- [2] G. Chassaing, A. Marquet, A ¹³C NMR study of the structure of sulfur-stabilized carbanions, *Tetrahedron*, **1978**, 34(9), p. 1399-404, [https://doi.org/10.1016/0040-4020\(78\)88337-9](https://doi.org/10.1016/0040-4020(78)88337-9)
- [3] S. Lavielle, S. Bory, B. Moreau, M.J. Luche, A. Marquet, A total synthesis of biotin based on the stereoselective alkylation of sulfoxides, *J. Am. Chem. Soc.*, **1978**, 100(5), p. 1558-63, <https://doi.org/10.1021/ja00473a038>
- [4] M. Lotierzo, B. Tse Sum Bui, D. Florentin, F. Escalettes, A. Marquet, Biotin synthase mechanism: an overview, *Biochem. Soc. Trans.*, **2005**, 33(Pt 4), p. 820-3, <https://doi.org/10.1042/bst0330820>
- [5] D. Guianvarc'h, L'émergence de l'interface chimie-biologie en France, *L'Act. Chim.*, **2021**, 468, p. 9-12.
- [6] Le rôle de la communauté scientifique dans le débat sur les substances chimiques. Recommandations du COMETS à l'occasion de la mise en œuvre du règlement REACH, <https://comite-ethique.cnrs.fr/wp-content/uploads/2023/01/OPINION-2009-19.pdf>
- [7] A. Marquet, Commission Chimie et Société : le mot de la Présidente, *L'Act. Chim.*, **2004**, 280-281, p. 87.
- [8] A. Marquet, Je suis la clé de la vie..., *L'Act. Chim.*, **1999**, 229, p. 12-17.
- [9] Commission Chimie et Société, www.chimieetsociete.org
- [10] Colloques Chimie et Société, www.chimieetsociete.org/evenements/les-colloques.html
- [11] Y. Jacquot, A. Marquet, Faut-il avoir peur du bisphénol A ?, *L'Act. Chim.*, **2013**, 378-379, p. 11-19.
- [12] A. Marquet, De l'arme chimique à l'agent thérapeutique : deux exemples, *L'Act. Chim.*, **2014**, 391, p. XIII-XVIII.
- [13] Rencontres Chimie & Terroir, www.chimieetsociete.org/chimie-et-terroir.html
- [14] A. Marquet, Chimie et société : construire un dialogue, *L'Act. Chim.*, **2011**, 355.
- [15] A. Marquet, Chimie et société : quel dialogue ? Une consultation participative initiée par la commission Chimie et Société, *L'Act. Chim.*, **2011**, 355, p. 33-36.
- [16] L. Valade, M.-C. Vitorge, A. Marquet, Pour réconcilier chimie et grand public : la chimie s'invite au marché, *L'Act. Chim.*, **2008**, 325, p. 4.

Honneurs et distinctions

1961	Prix Eugène Schueller (ENSCP)
1971	Prix de la division Chimie organique de la Société Française de Chimie
1986	Prix La Caze de l'Académie des sciences
1986	Médaille Berthelot de l'Académie des sciences
1988	Médaille d'argent du CNRS
1994	Grand prix Achille Le Bel de la Société Chimique de France
1996	Chevalière de la Légion d'honneur
2000	Officière de l'Ordre national du Mérite
2000	Professeure émérite à l'UPMC (Sorbonne Université)
2006	Officière de l'Ordre des Palmes académiques
2012	Officière de la Légion d'honneur
2018	Commandeure de l'Ordre des Palmes académiques

Les activités de l'association

Les positions de l'association

Elles sont consultables sur le site national :

<https://www.udppc.asso.fr/nos-positions>

et le rapport d'activité l'est depuis le site de la revue

(suivre le lien et cliquer sur l'icône pdf) :

https://bupdoc.udppc.asso.fr/consultation/article-bup.php?ID_fiche=24338

L'enseignement au collège

L'UdPPC est intervenue au ministère dans le cadre de la *rénovation du programme de Sciences et technologie*. Une enquête conçue par l'association sur les conditions d'exercices des collègues a été l'occasion de réaffirmer la nécessité de pouvoir faire expérimenter les élèves.

La physique et la chimie au lycée et au baccalauréat

L'UdPPC s'est battue pour le retour en juin des épreuves de spécialités au lycée général et technologique, pour une redéfinition du grand oral, et a fait des propositions concrètes pour des programmes raisonnables en termes de contenus et de difficulté, en adéquation avec le temps de formation et la réalité des élèves.

La formation des enseignants

L'UdPPC anime des journées de formation dans les académies et organise chaque année le Congrès des professeurs de physique et de chimie (Clermont-Ferrand en 2023 ; Brest en 2024 ; Strasbourg en 2025 ; Bastia en 2026 et Toulouse en 2027).

Quels contenus pour quelle formation ?

L'UdPPC soutient, avec l'Académie des sciences, le principe que les sciences doivent être au cœur de l'éducation et de la formation de tous les citoyens, quelles que soient leurs origines et leurs occupations.

Les actions scientifiques

L'UdPPC soutient les Olympiades de physique et de chimie aux niveaux national et international et organise le concours *La physique quantique en posters* dans le cadre de l'Année internationale des sciences et technologies quantiques (année scolaire 2025-2026).

Les relations avec les partenaires européens

L'UdPPC est représentée dans divers congrès scientifiques comme le congrès des sciences en Allemagne, en Belgique, en Italie, en Suisse pour échanger au niveau européen sur nos enseignements spécifiques.

Le site Internet

L'association, nos positions, les congrès, les publications, BupDoc, les actualités, les annales, les ressources, l'adhésion/abonnement, des sites académiques, l'agenda (cf. QR-code ci-contre).



Toulouse



Une page dédiée pour chaque académie

Nous contacter

Les bureaux

42 rue Saint-Jacques - 75005 Paris

Tél. : 01 40 46 83 80

secretariat.national@udppc.asso.fr

Le président

Philippe GOUTVERG

presidence@udppc.asso.fr

Les secrétaires

Pour les abonnements

Sabine ASSAL

abonnement@udppc.asso.fr

Secrétariat du Bup

Catherine FRANÇOIS

lebup.secretaire@udppc.asso.fr



Nos réseaux sociaux



L'UdPPC c'est vous !

n'hésitez pas à adhérer à l'UdPPC

et/ou

vous abonner au bulletin Le Bup

Les brumes de Titan

Des grains organiques formés dans la haute atmosphère ionisée

Audrey CHATAIN

Résumé Titan, la plus grande lune de Saturne, possède une atmosphère un peu plus épaisse que notre Terre, et elle est étrange : elle est remplie de poussières orangées. La mission spatiale Cassini-Huygens s'en est approchée pour la première fois en 2004 et a découvert que ces poussières sont formées par une chimie induite par les UV et particules énergétiques dans la haute atmosphère. Cet article présente une étude réalisée au LATMOS (Laboratoire Atmosphères, Observations Spatiales) et au LPP (Laboratoire de Physique des Plasmas), combinant simulations expérimentales et analyses d'observations de Cassini, afin de comprendre comment ces aérosols organiques évoluent dans leur environnement ionisé.

Mots clés Titan, photochimie, aérosols organiques, atmosphères planétaires, plasmas de laboratoire, mission spatiale.

Abstract The hazes of Titan: organic particles formed in the ionized upper atmosphere

Titan, Saturn's largest moon, has an atmosphere slightly thicker than Earth's, and it is strange: it is filled with orange dust. The Cassini-Huygens space mission first approached it in 2004 and discovered that this dust is formed by chemistry induced by UV rays and energetic particles in the upper atmosphere. This article presents a study conducted at LATMOS and LPP, combining experimental simulations and analyses of Cassini observations, in order to understand how these organic aerosols evolve in their ionized environment.

Keywords Titan, photochemistry, organic aerosols, planetary atmospheres, laboratory plasmas, space mission.

<https://doi.org/10.1051/refdp/202683016>

Le système climatique de la lune de Saturne, Titan, est gouverné par la production intense d'aérosols organiques dans sa haute atmosphère, sous l'effet de rayonnements UV et de particules énergétiques. Ce phénomène s'est aussi certainement produit sur Terre au moment de l'apparition de la vie, avant la Grande Oxygénation.

Ces deux points motivent fortement les recherches sur les processus de formation et d'évolution des aérosols dans l'atmosphère de Titan.

Ce qu'on sait sur ces grains organiques

Titan, alerte pollution aux particules fines

Titan est une lune de Saturne étonnante, qui présente de nombreuses similitudes avec la Terre, dont en particulier un cycle hydrologique à sa surface et une atmosphère épaisse composée principalement de diazote [1]. Toutefois, une particularité majeure de Titan provient de ses aérosols. Des composés organiques orangés emplissent son atmosphère sous la forme d'aérosols et sédimentent à sa surface, formant localement des dunes. L'omniprésence des aérosols orangés dans l'atmosphère et à la surface est aisément observable sur les clichés de la *figure 1*. Les brumes d'aérosols sont particulièrement denses jusqu'à 500 km d'altitude.

La composition de l'atmosphère de Titan ressemble en particulier à celle de la Terre juste avant et aux débuts de l'apparition de la vie. Elle est composée principalement de diazote avec quelques pourcents de méthane, comme sur Terre avant l'évènement de la Grande Oxygénation, période lors de laquelle l'oxygène se répand dans l'atmosphère, il y a environ 2,3 milliards d'années. Des travaux suggèrent que la Terre à cette époque aurait également pu posséder une

brume organique [2]. L'étude de Titan est ainsi intéressante pour comprendre comment de la matière organique complexe prébiotique aurait pu se former et évoluer dans l'atmosphère de la Terre aux premiers instants de la vie.

Une chimie ionique complexe dans l'ionosphère

Titan a été visité par la mission Cassini-Huygens entre 2004 et 2017. La mission était composée d'un atterrisseur (Huygens), fourni par l'ESA, ainsi que d'un orbiteur (Cassini), réalisé par la NASA. Cassini a survolé Titan 126 fois et est descendu jusqu'à 880 km d'altitude. Cette mission a notamment permis une découverte fondamentale : les aérosols commencent à se former très haut dans l'atmosphère, à environ 1000-1200 km d'altitude [3].

À cette altitude se trouve l'ionosphère, une couche de l'atmosphère ionisée. Sur Titan, la principale source d'ionisation sont les photons solaires dans l'extrême UV. D'autres sources d'ionisation sont aussi présentes et dominant côté nuit, dont en particulier des électrons énergétiques en provenance de la magnétosphère de Saturne. Le dépôt d'énergie de ces photons et particules énergétiques conduit à la dissociation et à l'ionisation du diazote et du méthane de l'atmosphère, formant des radicaux, des espèces excitées, des ions et des électrons libres : c'est un plasma naturel.

La présence de ces espèces réactives formées principalement d'azote, de carbone et d'hydrogène induit une chimie organique complexe. Le spectromètre de masse INMS (« *ion neutral mass spectrometer* ») embarqué sur la sonde Cassini a ainsi collecté des molécules et des ions positifs de masse allant jusqu'à 100 u (unité de masse atomique), sa limite de détection. Certains de ces composés ont pu être identifiés, notamment C_2H_2 , C_2H_4 , C_2H_6 , CH_3C_2H , C_3H_6 , C_4H_2 , C_6H_6 , HCN,

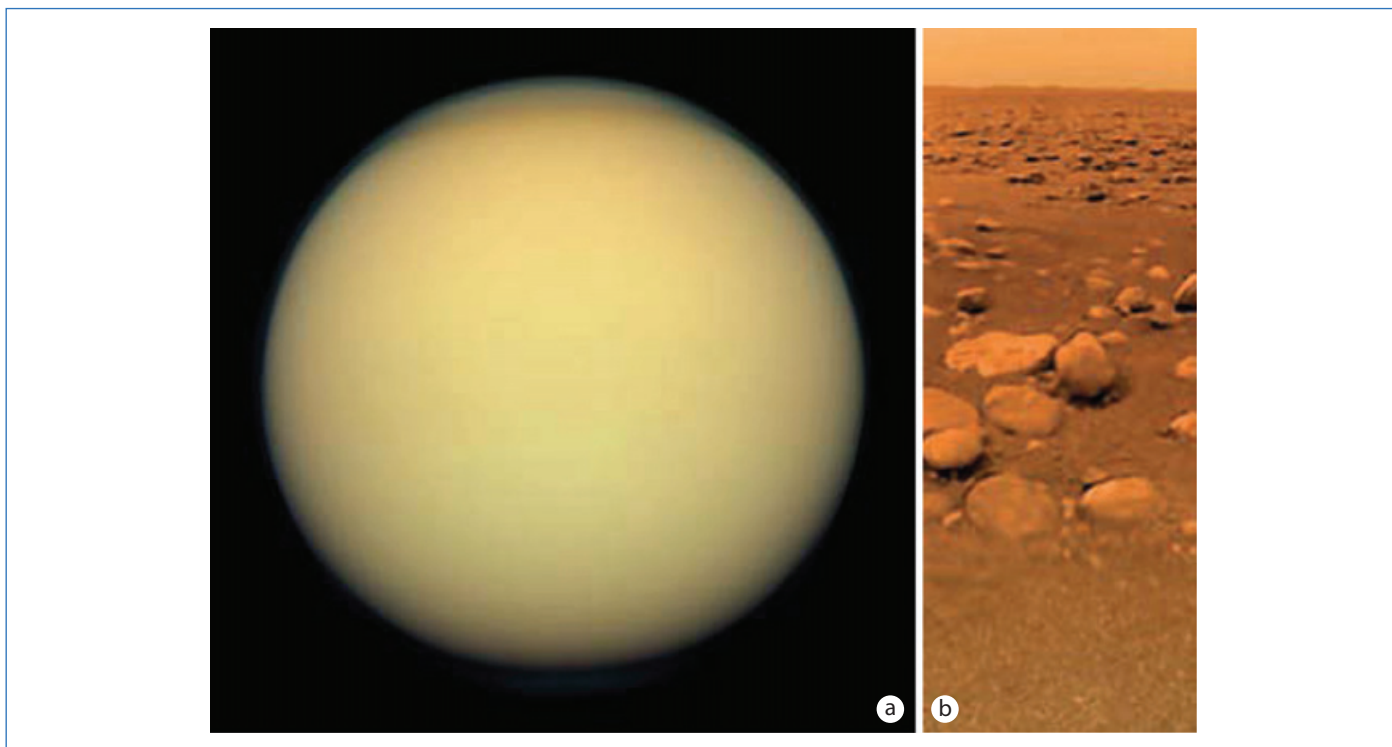


Figure 1 - (a) Titan observé par la sonde Cassini en janvier 2012. (b) Surface de Titan photographiée par la sonde Huygens en janvier 2005. © NASA/ESA.

CH_3CN , HC_3N , $\text{C}_2\text{H}_5\text{CN}$, C_2N_2 et NH_3 . Des indices de la présence d'ions plus lourds ont pu être déduits des mesures du spectromètre CAPS (« Cassini plasma spectrometer »), avec des ions positifs jusqu'à 350 u/q (unité de masse atomique par charge) et des ions négatifs extrêmement lourds, jusqu'à 13 800 u/q. L'estimation de la taille de tels ions donne des petits aérosols, de 3,8 nm à plus de 38 nm selon leur charge. Pour aller plus loin dans la compréhension de la chimie atmosphérique conduisant à la production d'ions complexes, plusieurs modèles de photochimie ont été élaborés. Ils ont en particulier montré qu'une chimie couplée des espèces neutres et des ions est nécessaire pour expliquer les observations. La présence des aérosols dans l'ionosphère est toutefois plus complexe à modéliser. Ils interagissent électrostatiquement avec le plasma ; il s'agit d'un plasma qualifié de « poudreux ».

Simuler l'ionosphère de Titan en laboratoire

Une autre stratégie, complémentaire de la modélisation numérique, est la simulation en laboratoire. Reproduire la chimie de Titan expérimentalement présente trois intérêts majeurs : (1) le phénomène étudié est alors accessible, directement au laboratoire, et peut être répété ; (2) il est possible de faire varier volontairement certains paramètres pour étudier un processus en particulier ; (3) des instruments de pointe et non spatialisables peuvent être utilisés.

De telles expériences ont commencé dès 1953 avec l'expérience de Stanley Miller et Harold Urey dont l'objectif était de savoir si les composés organiques requis pour la vie auraient pu être produits dans l'atmosphère de la Terre primitive. Deux décennies plus tard, Carl Sagan et Bishun Khare ont réalisé de telles simulations de laboratoire adaptées à Jupiter, Saturne et Titan. Ils ont montré que l'exposition d'une atmosphère réductrice (du type $\text{N}_2\text{-CH}_4$) à des décharges électriques conduit à la formation d'un solide organique brun-orangé, qu'ils ont appelé « tholins » [4]. Aujourd'hui, nous savons grâce à la mission Cassini-Huygens que les aérosols de Titan sont formés à partir d'une chimie ionique complexe dans le plasma

ionosphérique. Il est alors possible de reproduire le plasma ionosphérique au laboratoire à l'aide d'une décharge plasma dans un mélange $\text{N}_2\text{-CH}_4$.

Une telle expérience a été développée au LATMOS : PAMPRE, pour « Production d'Aérosols en Microgravité par Plasma REactif ». Une décharge plasma radiofréquence en couplage capacitif (RF CCP) est allumée dans une chambre contenant un mélange de diazote et de méthane à 1 mbar. Un matériau solide brun-orangé se forme alors dans la décharge, tout comme pour l'expérience de Sagan et Khare. Toutefois, l'avantage d'utiliser une décharge RF CCP est que les tholins sont produits sous forme d'aérosols en lévitation électrostatique dans le plasma dans lequel ils séjournent quelques minutes [5]. Tout comme sur Titan, les molécules et ions de la phase gaz ont pu être étudiés par spectrométrie de masse et une grande ressemblance a été observée avec les mesures de Cassini. Après l'arrêt de la décharge plasma, les grains de tholins déposés au fond de la chambre peuvent être récoltés et analysés. Ce sont des grains sphériques d'environ 100 nm à 2 μm de diamètre, composés principalement de carbone, d'azote et d'hydrogène. L'analyse chimique des tholins par spectrométrie de haute résolution indique qu'ils sont constitués en partie de « briques » élémentaires telles que C_2H_2 et HCN.

Évolution des aérosols dans l'ionosphère

Que ce soit sur Titan ou dans PAMPRE, les tholins restent un certain temps au contact du plasma dans lequel ils se sont formés. Ils sont ainsi susceptibles d'interagir avec celui-ci. Quelques travaux ont montré que les tholins ne sont pas inertes entre autres aux UV et aux atomes d'hydrogène. Qu'en est-il des autres espèces du plasma ? Durant leur séjour dans le plasma, les aérosols sont continuellement au contact d'espèces très réactives (radicaux, espèces excitées, ions et électrons). Cette question a permis de formuler l'objectif de cette étude : étudier l'interaction entre les aérosols et le plasma dans l'ionosphère de Titan. Pour y apporter des

réponses, deux voies ont été suivies : la simulation en laboratoire et l'étude de données de la mission Cassini.

Évolution des aérosols organiques dans l'ionosphère : études au laboratoire

Méthode : simulation des espèces érosives à l'aide d'une décharge plasma en N_2-H_2

La première partie du projet a donc visé à reproduire en laboratoire l'interaction entre les aérosols et le plasma de l'ionosphère de Titan. L'idée est ainsi d'introduire des tholins dans une décharge plasma et d'observer les modifications induites sur les tholins et sur le plasma. Les interactions entre les aérosols et le plasma sont complexes. Deux principaux processus, d'effets opposés, ont lieu en parallèle dans l'ionosphère de Titan : (1) la croissance organique orchestrée par la formation de chaînes carbonées et (2) les processus d'évolution des structures chimiques. Le premier de ces processus ne peut être réalisé qu'à partir d'espèces contenant du carbone, à l'inverse du second qui peut avoir lieu sans espèces carbonées. Ce projet s'est essentiellement intéressé au processus (2), traitant de l'évolution des tholins. Ainsi, pour restreindre tous les processus de croissance organique dans l'expérience, uniquement du diazote et du dihydrogène ont été injectés dans la phase gaz.

La décharge choisie pour l'expérience est de type continu (DC ou « glow »). Ces décharges plasma sont les plus simples à concevoir et étudier, avec l'avantage de présenter une large zone de plasma homogène. Un flux de gaz est injecté dans un tube en Pyrex à une pression d'environ 1 mbar et une décharge électrique est initiée entre deux électrodes métalliques placées de part et d'autre du tube.

La première étape a été de caractériser le plasma N_2-H_2 . La présence de dihydrogène dans un plasma de diazote entraîne la formation d'espèces très réactives, en particulier les atomes H et N, ainsi que les radicaux NH et NH_2 , des espèces vibrationnellement excitées $N_2(v)$ et des ions comme N_2H^+ , NH_4^+ ou H_3^+ [6]. Ces ions ont été mesurés sur Titan et les modèles chimiques prédisent également la présence de radicaux et espèces excitées.

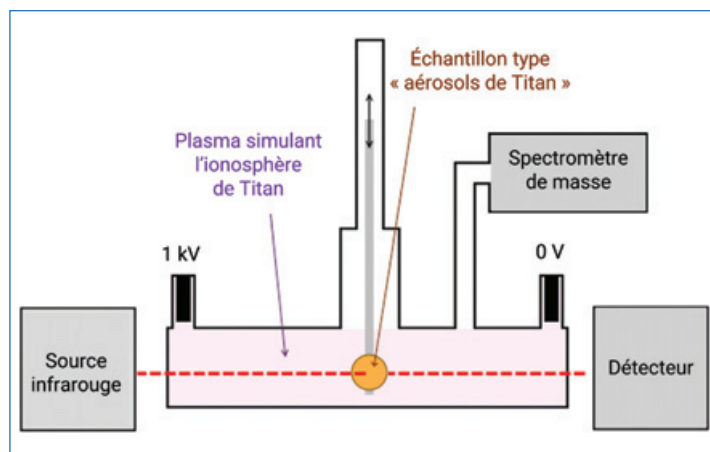


Figure 2 - Schéma de l'expérience THETIS.

Développement de l'expérience THETIS

La deuxième étape du projet a été d'introduire des tholins dans le plasma N_2-H_2 et de caractériser les éventuelles évolutions. Un nouveau dispositif expérimental a été conçu pour l'occasion, nommé THETIS (« *Tholins Evolution in Titan's Ionosphere Simulation* »). Il permet d'ajouter l'échantillon de tholins sous vide après allumage du plasma et se couple à différents instruments pour étudier *in situ* l'échantillon et le plasma (voir figures 2 et 3). Les tholins sont préalablement formés dans PAMPRE et étalés sur une fine grille métallique servant de support.

Évolution morphologique et chimique des aérosols

Lorsque la grille de tholins est introduite dans un plasma de diazote pur, aucun effet n'est visible. À l'inverse, lorsqu'elle est introduite dans un plasma contenant 0,5 à 5 % de H_2 , il est possible d'observer l'érosion de la pastille à l'œil nu. Plus en détail, des images prises au microscope électronique à balayage (MEB) montrent que les grains de tholins initialement sphériques sont creusés et présentent des marques d'érosion de quelques dizaines de nanomètres (voir figure 4). La structure chimique des tholins a également été observée par spectroscopie d'absorption infrarouge [7]. L'absorption d'un faisceau infrarouge par les tholins renseigne sur les

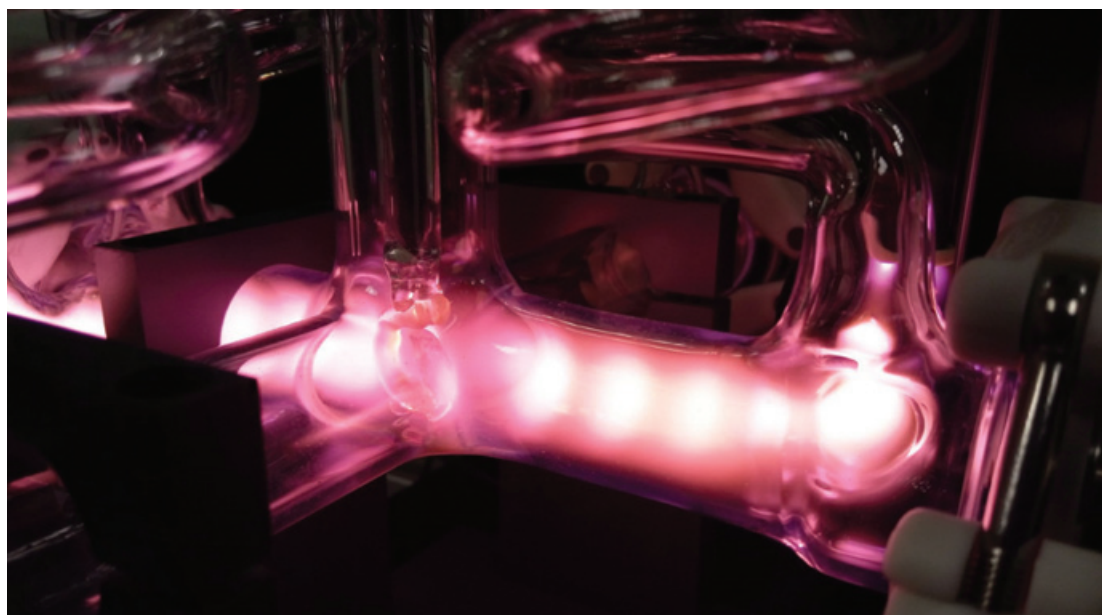


Figure 3 - Photographie de l'expérience THETIS. L'échantillon est visible au centre du plasma.

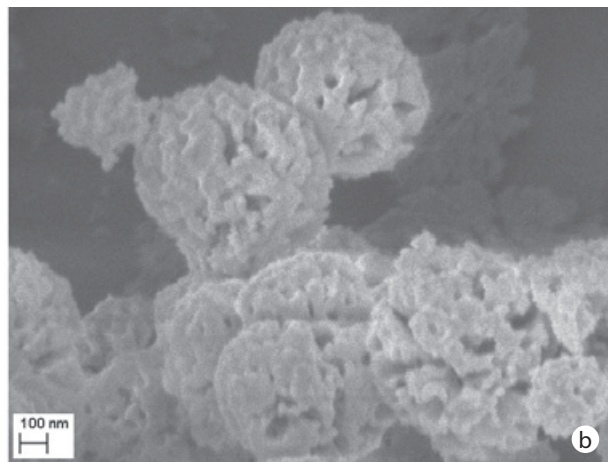
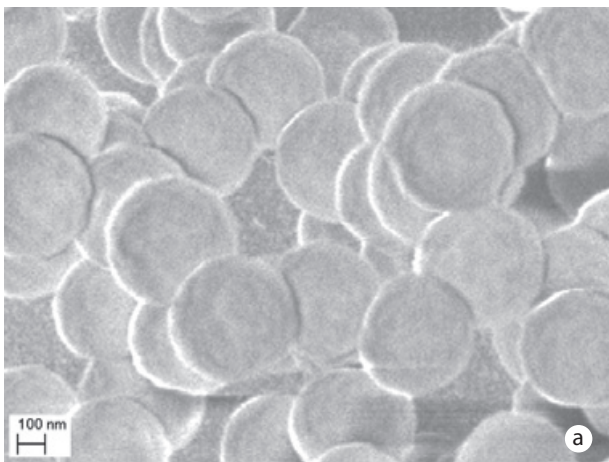


Figure 4 - Images des tholins (a) produits dans PAMPRE et (b) après exposition à un plasma de N_2-H_2 . Images prises par N. Ruscassier au LGPM/CentraleSupélec.

fonctions chimiques présentes. Cette technique montre que les fonctions chimiques des tholins évoluent lorsqu'ils sont exposés au plasma de N_2-H_2 .

En particulier, les fonctions nitriles ($C\equiv N$) diminuent fortement en comparaison des autres fonctions. Les doubles liaisons semblent aussi diminuer par rapport aux amines (NH) et aux bandes CH. Plus en détail dans les bandes des nitriles, les isonitriles ($-N\equiv C$) disparaissent très rapidement et une autre bande de nitriles plus stable se forme.

Évolution du plasma en contact avec les tholins

L'étude de la phase gaz a également révélé qu'elle est fortement modifiée par la présence des tholins [8]. La mesure des espèces neutres et des ions positifs par spectrométrie de masse montre que de nombreuses nouvelles espèces contenant du carbone apparaissent, dont en particulier du cyanure d'hydrogène HCN et des composés formés de nitriles (NH_3-CN , $NC-CN$). Des ions très insaturés sont aussi observés, tels que C^+ , C_2^+ , C_2H^+ , C_3^+ , C_3H^+ et $C_3H_2^+/C_2N^+$.

À l'inverse, la production d'ammoniac diminue par rapport au cas sans tholins.

Interaction entre les aérosols et le plasma

Ces expériences ont montré que les tholins interagissent avec le plasma de N_2-H_2 dans lequel ils sont introduits. Dans le domaine de la microélectronique, plusieurs travaux ont étudié un processus similaire, avec notamment l'exposition de films formés de carbone et d'hydrogène à des plasmas de N_2-H_2 . Ces expériences conduisent également à la production de HCN, qui s'explique de la manière suivante : des atomes N du plasma s'adsorbent à la surface des films, puis réagissent progressivement avec les atomes de carbone du film pour former une triple liaison $C\equiv N$. Ensuite, un atome H s'y greffe, formant la molécule stable HCN.

Enfin, le bombardement ionique ayant lieu à la surface du film éjecte la molécule de HCN dans la phase gaz. Ce processus a très certainement lieu aussi sur les tholins et est cohérent avec nos observations : les mesures en absorption IR montrent la formation d'une nouvelle bande de $C\equiv N$ ainsi que la diminution globale de tous les nitriles, et l'étude de la phase gaz révèle l'apparition de HCN. D'autres processus de surface sont proposés et illustrés sur la figure 5.

L'expérience THETIS a mis en évidence l'interaction forte des grains de tholins avec les diverses espèces de plasmas dont, en particulier, les radicaux (atomes H et N, et NH). Des espèces du plasma s'adsorbent à la surface, modifient les liaisons chimiques de tholins et forment des fragments qui sont éjectés dans la phase gaz. Ces mécanismes, notamment la formation de nitriles sur les aérosols et de HCN en phase gaz, pourraient également être à l'œuvre dans l'ionosphère de Titan.

Des électrons perturbés par la présence des aérosols dans l'ionosphère : observations de la mission Cassini

Méthode : réanalyse des données de la sonde de Langmuir de Cassini

Un second grand axe de cette étude a été de chercher des indices dans les observations de Cassini confirmant une interaction aérosols-plasma dans l'ionosphère. Les grains des

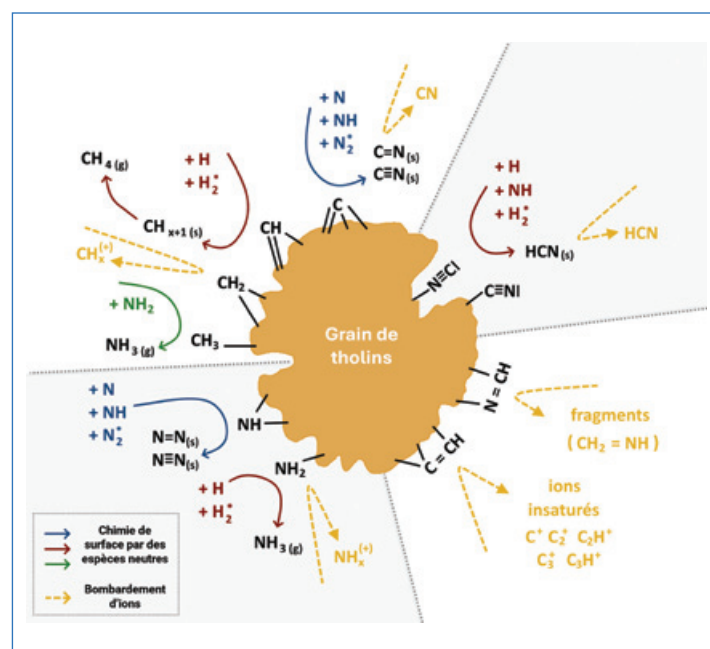


Figure 5 - Schéma représentant des suggestions de processus à l'œuvre à la surface d'un grain de tholins plongé dans un plasma de N_2-H_2 .



Figure 6 - Position de la sonde de Langmuir, repérée par la flèche rouge, sur la sonde Cassini. © NASA.

aérosols n'ont pas été directement détectés dans l'ionosphère par Cassini par manque d'instruments adaptés, mais le plasma autour a, quant à lui, été étudié en détail. Ce projet a été réalisé en collaboration internationale avec l'équipe de l'Institut Suédois des Plasmas Spatiaux (IRF) à Uppsala. Cette équipe a conçu la sonde de Langmuir à bord de Cassini, qui permet d'étudier les espèces chargées de faible énergie, et particulièrement les électrons [9].

La sonde de Langmuir est une sphère en titane de 5 cm de diamètre au bout d'une tige qui la positionne à plus de 1,5 m du corps du satellite (voir figure 6). Cette sphère est soumise à un potentiel électrique qui varie de façon continue entre -4 et $+4$ V. Lorsque le potentiel de la sonde est inférieur à celui du plasma, elle attire les ions positifs, et lorsqu'il est supérieur, elle attire les électrons. La mesure d'intérêt est le courant dû aux électrons parcourant la sonde.

Détection de plusieurs populations d'électrons dans les données Cassini

Généralement, dans un plasma ionosphérique, les électrons sont thermalisés par des collisions avec les molécules de leur environnement. Dans ce cas, la sonde de Langmuir mesure

une unique population d'électrons, représentée par une « bosse » dans le graphe de la dérivée seconde du courant électronique en fonction du potentiel de la sonde. Toutefois, les données montrent que dans l'ionosphère, pour des altitudes inférieures à 1 300 km, il n'y a pas une, mais deux, trois ou même parfois quatre telles bosses [10]. *A priori*, la sonde de Langmuir mesure donc plus d'une population d'électrons. L'ajustement du signal à partir des équations théoriques permet de déterminer la densité et l'énergie des électrons pour chaque population.

Lors d'un survol de Titan, la sonde Cassini réalise une trentaine de mesures dans l'ionosphère. Cela permet de suivre l'évolution de la densité et de l'énergie des électrons en fonction de l'altitude. Selon que la sonde est passée côté jour, proche du terminateur, ou côté nuit, les profils sont différents. Cassini a traversé 57 fois l'ionosphère de Titan, ce qui a permis de réaliser des statistiques sur les comportements des différentes populations d'électrons [11].

Des électrons émis par les aérosols

Cette étude a permis d'obtenir des indications sur l'origine des populations d'électrons (voir figure 7). La première population

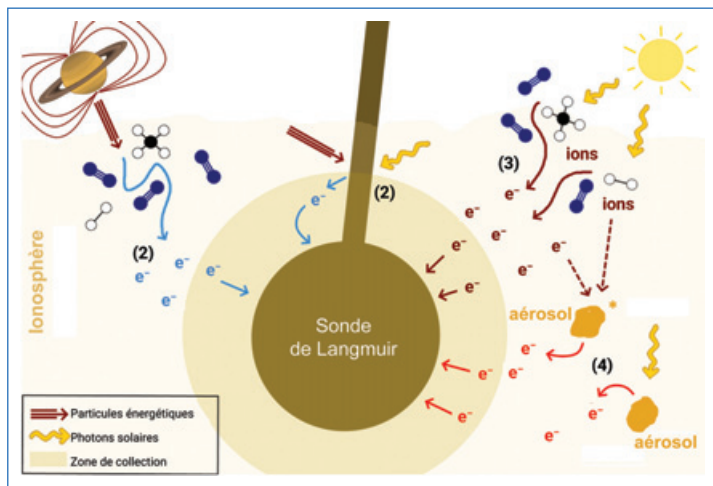


Figure 7 - Schéma proposant l'origine des quatre populations d'électrons observées par la sonde de Langmuir dans l'ionosphère de Titan.

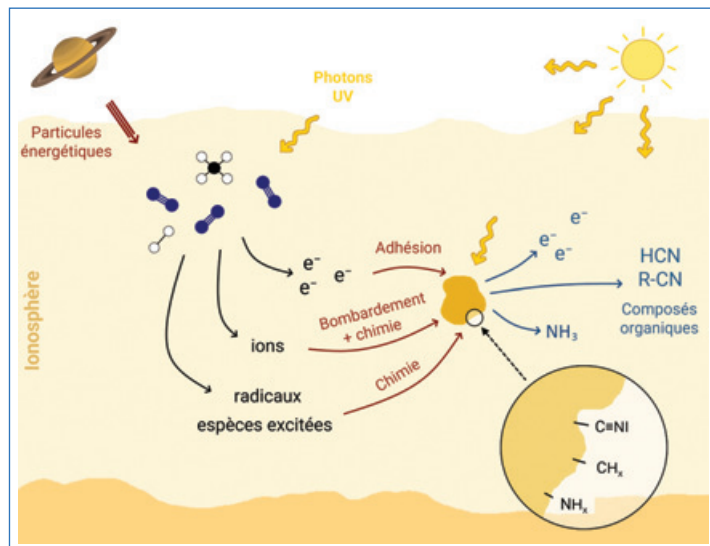


Figure 8 - Schéma bilan des interactions entre les aérosols organiques et les espèces du plasma ionosphérique de Titan discutées dans cette étude.

est attribuée à des électrons émis par la tige à proximité de la sonde après collision avec un photon solaire ou une particule énergétique provenant de la magnétosphère. La seconde population, toujours présente avec des densités et énergies constantes, est attribuée à des électrons thermalisés, provenant à l'origine de la magnétosphère. La densité de la troisième population est, pour sa part, fortement corrélée à l'illumination solaire et son énergie est globalement constante en dessous de 1 100 km. Elle est ainsi attribuée aux électrons formés par la photoionisation des molécules de l'ionosphère de Titan.

Enfin, la quatrième population n'est présente que côté jour et en dessous de 1 200 km, altitude à partir de laquelle les aérosols commencent à se former. Il est possible qu'elle soit due à des électrons émis par les aérosols après qu'ils ont été percutés par un photon solaire énergétique (photoémission) ou après avoir été chauffés au-delà d'un certain seuil par la chimie environnante (émission thermo-ionique). Ces deux mécanismes ont été observés en laboratoire.

En attendant la mission Dragonfly

La mise en place de l'expérience THETIS et l'analyse des données de la sonde de Langmuir de Cassini dans l'ionosphère de Titan ont permis d'observer l'interaction entre les aérosols organiques et les espèces du plasma environnant. Les grains sont eux-mêmes chimiquement modifiés par interaction avec des espèces réactives telles que les atomes H et N (radicaux). Les aérosols participent aussi à l'évolution du plasma, en adsorbant certaines espèces et en en formant de nouvelles, dont en particulier HCN et des électrons (voir figure 8). Ces travaux ont permis de déceler des mécanismes se produisant à la surface des aérosols sur Titan. La prochaine étape sera de les modéliser.

Après leur traversée de l'ionosphère, l'aventure des aérosols n'est pas terminée, ils s'agglomèrent et deviennent des noyaux de condensation des espèces gazeuses. Lorsqu'ils sédimentent à la surface, ils ont encore certainement évolué. La mission Dragonfly de la NASA prévoit d'étudier la surface de Titan dans quelques années. Elle donnera accès à la composition et à la morphologie des aérosols une fois au sol. Toutefois, il reste encore des études à mener au laboratoire pour faire le lien entre les aérosols de l'ionosphère et les grains sédimentés à la surface.

Cet article a été initialement publié dans *Reflets de la physique, la revue de la Société Française de Physique (SFP)*, dans le numéro 83 de janvier 2026, accessible en ligne*. Il est reproduit dans *L'Actualité Chimique*, avec l'aimable accord de son autrice, dans le cadre d'un partenariat entre les deux revues impliquant la division Chimie physique (DCP), commune à la SCF et la SFP.

* www.refletsdelaphysique.fr/articles/refdp/abs/2026/01/contents/contents.html

- [1] A. Le Gall *et al.*, *Les mondes de Saturne*, Belin, **2022**.
- [2] G. Arney *et al.*, The pale orange dot: the spectrum and habitability of hazy Archean Earth, *Astrobiology*, **2016**, 16, p. 873-99, <https://doi.org/10.1089/ast.2015.1422>
- [3] J. H. Waite Jr. *et al.*, The process of tholin formation in Titan's upper atmosphere, *Science*, **2007**, 316, p. 870-5, <https://doi.org/10.1126/science.1139727>
- [4] C. Sagan, B. Khare, Tholins: organic chemistry of interstellar grains and gas, *Nature*, **1979**, 277, p. 102-7, <https://doi.org/10.1038/277102a0>
- [5] C. Szopa, G. Cernogora, L. Boufendi, J.J. Correia, P. Coli, PAMPRE: a dusty plasma experiment for Titan's tholins production and study, *Planet Space Sci.*, **2006**, 54, p. 394-404, <https://doi.org/10.1016/j.pss.2005.12.012>
- [6] A. Chatain *et al.*, Characterization of a DC glow discharge in N₂-H₂ with electrical measurements and neutral and ion mass spectrometry, *Plasma Sources Sci. Technol.*, **2023**, 32, 035002, <https://doi.org/10.1088/1361-6595/acc132>
- [7] A. Chatain *et al.*, Interaction dust-plasma in Titan's ionosphere: an experimental simulation of aerosols erosion, *Icarus*, **2020**, 345, 113741, <https://doi.org/10.1016/j.icarus.2020.113741>
- [8] A. Chatain, N. Carrasco, L. Vettier, O. Guaitella, Interaction dust-plasma in Titan's ionosphere: feedbacks on the gas phase composition, *Icarus*, **2023**, 396, 115502, <https://doi.org/10.1016/j.icarus.2023.115502>
- [9] J.-E. Wahlund *et al.*, Cassini measurements of cold plasma in the ionosphere of Titan, *Science*, **2005**, 308, p. 986-9, <https://doi.org/10.1126/science.1109807>
- [10] A. Chatain *et al.*, Re-analysis of the Cassini RPWS/LP data in Titan's ionosphere: 1. Detection of several electron populations, *J. Geophys. Res. Space Phys.*, **2021**, 126, e2020JA028412, <https://doi.org/10.1029/2020JA028412>
- [11] A. Chatain *et al.*, Re-analysis of the Cassini RPWS/LP data in Titan's ionosphere: 2. Statistics on 57 flybys, *J. Geophys. Res. Space Phys.*, **2021**, 126, e2020JA028413, <https://doi.org/10.1029/2020JA028413>

Audrey CHATAIN* est chargée de recherche au CNRS au LATMOS (Laboratoire Atmosphères et Observations Spatiales), Département Système solaire, Guyancourt.

*audrey.chatain@latmos.ipsl.fr

Distinctions et nominations

Alain Wagner, Médaille de l'innovation 2025 du CNRS



Photo Cyril Frésillon / CNRS images.

Le 17 décembre dernier, Alain Wagner a reçu la Médaille de l'innovation du CNRS. Directeur de recherche CNRS au sein du laboratoire Chémobiologie synthétique et thérapeutique de Strasbourg (CNRS/Université de Strasbourg), il développe de nouvelles approches afin de mieux comprendre et de modifier les systèmes biologiques.

Avec l'équipe « Chimie bio-fonctionnelle » qu'il co-dirige, il s'intéresse notamment depuis 2010 aux conjugués anticorps-médicaments (ADC), des vecteurs qui permettent de détruire les cellules cancéreuses et d'augmenter l'espérance de vie des patients. Pour transférer ces résultats de recherche vers le monde industriel, Alain Wagner a co-fondé en 2014 Syndivia, une startup de biotechnologie qui développe des ADC mieux tolérés, avec moins d'effets secondaires. Il est également à l'origine de la création de la startup NovAliX, fondée en 2002 et spécialisée dans la découverte de nouveaux médicaments, et de Phytodia, créée en 2007, qui développe des ingrédients végétaux pour les compléments alimentaires et les cosmétiques. Plus récemment, il a co-fondé MicroOmix, une startup qui analyse les anticorps sécrétés par chaque cellule. De quoi ouvrir notamment la voie au développement de nouvelles thérapies basées sur les anticorps.

• Source : communiqué de presse CNRS, 17/02/25, www.cnrs.fr/sites/default/files/press_info/2025-12/CP_Médaille_inno_2025_VDef_0.pdf

Sophie Carenco ERC Proof of Concept 2025

Le Conseil européen de la recherche (ERC) a retenu fin janvier 136 projets candidats pour la deuxième vague de l'appel « Proof of Concept » du programme cadre Horizon Europe, dont douze en France.

Parmi eux, la chimiste Sophie Carenco, directrice de recherche au Centre Interdisciplinaire de Nanoscience de Marseille (CNRS/Aix-Marseille Université/INSERM) pour le projet PRELUDE – Precise Deuteration at the Tailored Surface of Nickel Phosphide Nanocatalysts.



Sophie Carenco explore la nanochimie, à la croisée de la chimie moléculaire et des matériaux. Elle conçoit et fabrique des nanomatériaux contenant des métaux (nickel, cobalt...), des terres rares (gadolinium, cérium...) et des éléments légers (phosphore, soufre, carbone), en contrôlant leurs structures cristallines et leurs surfaces. Elle étudie leurs réactions avec des petites molécules comme l'hydrogène pour développer de nouveaux catalyseurs efficaces en conditions douces. Elle s'intéresse aussi aux utilisations des nanoparticules pour des applications en optique et dans le contexte de la transition énergétique.

En 2025, elle a également été lauréate du Prix Fédération Gay-Lussac - Académie des sciences pour la chimie au cœur des enjeux de la société.

• Pour en savoir plus : www.inp.cnrs.fr/fr/personne/sophie-carenco

Lucie Jarrige, au sommet de la chimie et de l'escalade



Lucie Jarrige aux championnats du monde d'escalade 2018 à Innsbruck (Autriche) (photo : Simon Legner, CC BY-SA 4.0).

Fin septembre 2025, Lucie Jarrige a décroché son sixième titre de championne du monde de parascandale... tout en poursuivant ses recherches de chimie au CNRS. Rien ne freine cette compétitrice aussi bien sportive que scientifique, pas même son handicap.

Lucie soutient sa thèse en chimie organique en 2018 à l'Université Paris-Saclay



Rappel : Prix Pierre Potier 2027 – 20^e édition

Ce prix prestigieux organisé par la Maison de la Chimie et France Chimie encourage, valorise et récompense les innovations des entreprises de la chimie en faveur du développement durable (voir p. 60 du numéro de février).

Grandes entreprises, ETI, PME, PMI, startups, participez à ce 20^e anniversaire et ne manquez pas cette occasion de mettre en lumière sur la scène nationale vos projets qui allient performance et respect de l'environnement.

Cette candidature permet également de s'inscrire à la 9^e édition du **Prix Potier des Lycéens** et de sensibiliser les jeunes aux enjeux de l'innovation dans le secteur de la chimie.

• Candidature à adresser avant le 31 mai 2026.

www.francechimie.fr/media/08e/ppp27-presentation.pdf

Appel Résurgence@CNRS Chimie 2026

Résurgence est un appel à projet au fil de l'eau de CNRS Chimie qui soutient les chercheuses et enseignantes-chercheuses chimistes après un congé maternité pour les aider lors de la reprise de leurs travaux scientifiques. Depuis 2025, il est élargi au congé parental des chercheuses et des enseignantes-chercheuses ainsi qu'aux chercheurs et enseignants-chercheurs.

• Pour en savoir plus : www.inc.cnrs.fr/fr/cnrsinfo/appel-resurgencenrs-chimie-2026

Les femmes chimistes en France en 2026



En 2024, les *Comptes Rendus Chimie de l'Académie des sciences* ont sorti un numéro spécial, édité par Janine Cossy, afin de mettre un coup de projecteur sur les réalisations scientifiques des femmes en France dans des domaines très variés de la chimie, offrant ainsi une visibilité précieuse à leurs parcours. Il s'agissait aussi d'encourager les jeunes générations à poursuivre une carrière dans la chimie. Ce numéro spécial est devenu un rendez-vous annuel, et la troisième édition, « Les femmes chimistes en France en 2026 », est parue début mars.

À l'occasion de sa sortie, une séance, inscrite dans le cadre du « Women's Breakfast » de l'IUPAC (Union internationale de chimie pure et appliquée), a été organisée à l'Académie des sciences. Chacune des treize autrices – Erica Benedetti, Isabelle Chataignier, Gaëlle Chouraqui, Jeanne Crassous, Maria Duca, Isabelle Gillaizeau, Corinne Gosmini, Laurence Grimaud, Anne Imbert, Valérie Keller, Laurence Miesch, Florence Mongin et Anne Robert – a exposé pendant cinq minutes un message de son choix, sur son parcours, ses recherches, sa thématique scientifique ou sa vision de la recherche, offrant un beau panorama de leur excellence scientifique (à découvrir dans le numéro*) et de la diversité de leurs parcours.

Certaines ont profité de ce moment pour remercier leurs mentors et/ou pour témoigner de leur rencontre avec des figures féminines fortes qui leur ont permis de se projeter dans le parcours scientifique, d'« oser suivre la petite voix intérieure qui murmurait « Et si tu essayais ? » ». À leur tour, elles sont engagées en faveur de la

transmission pour montrer la voie, en parlant de leurs succès comme de leurs doutes, de « la curiosité qui [les] pousse au quotidien », de l'importance de l'ouverture d'esprit, de l'interdisciplinarité et des collaborations dans la recherche, « œuvre collective ». « Il faut oser sortir de son petit monde, suivre des projets qui vous passionnent, créer un environnement propice à l'épanouissement », mais aussi « apprendre à être autonome, identifier les opportunités qui sont données et défendre ses idées... »

• Janine Cossy (ed.), *Women Chemists in France in 2026*, *Comptes Rendus. Chimie*, 2026, 29, <https://doi.org/10.5802/crchim.sp.3>

* Numéro téléchargeable librement en ligne : https://comptes-rendus.academie-sciences.fr/chimie/item/CRCHIM_2025__28_54

Science au féminin dans les médias

Femmes en sciences : pourquoi si peu ? Entretien avec Clotilde Policar

Clotilde Policar, chimiste, directrice des études sciences à l'École Normale supérieure, était invitée le 28 février dernier dans *La Conversation scientifique*, émission d'Étienne Klein dédiée à la science et à ses spécialistes, où avec ses invités, ils mettent en lumière les savoirs des scientifiques, les questions qu'ils se posent et les moyens mis en œuvre pour trouver des réponses.

Pendant 60 minutes, elle a pu échanger sur la place qu'occupent les femmes en sciences. Nous sommes environ 8 milliards d'êtres humains, dont la moitié sont des femmes. En principe, les savoirs n'ont pas de sexe. Pourtant, peu de femmes s'engagent dans les carrières scientifiques. Comment expliquer cette sorte de paradoxe ? Cela

provient-il de différences naturelles ? De la puissance des stéréotypes ? D'une affaire de goût ou d'appétence ? Du moins est-ce ce qu'on entend souvent dire. Mais se pourrait-il que ces explications habituelles soient elles-mêmes des préjugés ? Une heure d'émission qui aurait pu se prolonger encore longtemps tant il y a à dire sur le sujet.

• À retrouver sur www.radiofrance.fr/franceculture/podcasts/la-conversation-scientifique/femmes-en-sciences-pourquoi-si-peu-4670017

La catalyse s'invite dans L'Esprit Sorcier



Céline Chizallet et Sébastien Roth, d'IFP Energies nouvelles, ont été les invités le 21 janvier dernier de l'émission « Science en questions » diffusée par la

plateforme *L'Esprit Sorcier**, pour une rencontre en direct d'environ une heure sur le thème de la catalyse. La conversion photocatalytique du CO₂ a notamment été discutée, en lien avec les activités de recherche réalisées à IFP Energies Nouvelles.

• À retrouver sur <https://youtu.be/8GJA8bsw2H4>
*<https://espritSORCIER.tv>

Podcasts Femmes de science



En collaboration avec l'Académie des sciences et TV5 Monde, Cortex Média, plateforme en ligne dédiée à l'éducation, la santé, le handicap et l'accessibilité

culturelle, met en lumière des figures féminines remarquables du monde scientifique contemporain à travers une série de podcasts qui conjuguent la science au féminin. Chaque épisode retrace le parcours d'une scientifique pour comprendre d'où vient cette envie de faire de la science.

Plongez dans le parcours inspirant de quatorze femmes scientifiques remarquables – comme Florence Gazeau et Claude Grison, membres de la section chimie de l'Académie des sciences –, qui redéfinissent les frontières de la connaissance, et d'un univers scientifique majoritairement masculin. Leurs témoignages sont une source d'inspiration pour les jeunes générations.

Nouveaux épisodes de Maman Chercheuse



Depuis la présentation dans nos colonnes* de *Maman Chercheuse* de la chimiste Sidonie Rosset, actuellement doctorante à l'École Normale Supérieure – PSL, qu'elle a débuté avec son frère illustrateur Léonard alors qu'elle était étudiante en Master 2 dans le cadre de sa formation, de nouveaux épisodes ont été publiés par ce duo très créatif et inspiré. Ce projet de vulgarisation scientifique, qui a reçu un financement de la Fondation de la Maison de la Chimie, propose des vidéos graphiques de 5 minutes accessibles dès 13-14 ans, sous forme de dialogues entre une chercheuse et sa fille. L'objectif est double : rendre la chimie accessible et promouvoir l'égalité des genres dans la science. Sidonie travaille étroitement

avec une chercheuse pour bâtir chaque épisode.

Après les dendrimères (avec Valérie Marvaud, CNRS, Sorbonne Université), les fluorophores (avec Sophie Michéris, ENS-PSL), les microglies (avec Camille Paoletti, IBENS), trois nouveaux épisodes sont en ligne (et de nouveaux sont en cours de réalisation) :

- Épisode 4 : **Les pansements antibactériens**, avec Mathilde Lepoitevin, maîtresse de conférences au Département de chimie de l'École Normale Supérieure (ENS-PSL) au sein de l'Institut des Matériaux poreux de Paris (IMAP)

- Épisode 5 : **Les caoutchoucs recyclables**, avec Sophie Norvez, professeure à l'ESPCI Paris-PSL, rattachée au laboratoire C3M (Chimie Moléculaire, Macromoléculaire, et Matériaux)

- Épisode 6 : **La matière noire**, avec Françoise Combes, astrophysicienne à l'Observatoire de Paris-PSL, professeure émérite titulaire au Collège de France, présidente de l'Académie des sciences.

• <http://maman-chercheuse.fr>

et www.youtube.com/@MamanChercheuse

* Voir « Maman Chercheuse », un projet récompensé par le prix SCF-IdF de médiation scientifique 2025, *L'Act. Chim.*, 2025, 507, p. 46, <https://new.societechimiquedefrance.fr/numero/maman-chercheuse-un-projet-recompense-par-le-prix-scf-idf-de-mediation-scientifique-2025-p46-n507>

La Science taille XX elles

Le projet d'exposition « La Science taille XX elles » de l'association Femmes & Sciences, en collaboration avec le



Encarnación Torralba Peñalver, électrochimiste.
© Vincent Moncorgé / CNRS / Femmes & Sciences.

CNRS, met en lumière des femmes scientifiques qui font la science d'aujourd'hui dans des disciplines variées à travers une série de portraits du photographe Vincent Moncorgé.

Développé à l'origine en 2018 à Toulouse, le projet a essaimé dans d'autres régions, donnant une belle galerie qui compte aujourd'hui près de 120 portraits accessibles en ligne avec un catalogue présentant ces ambassadrices des sciences.

• www.femmesetsciences.fr/la-science-taille-xx-elles-france



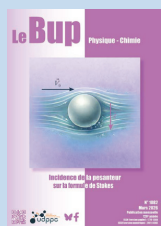
Chemistry International – Janvier-Mars 2026

Le dernier numéro de *Chemistry International - The News Magazine of IUPAC* est à retrouver et à télécharger librement en ligne : <https://iupac.org/etoc-chemistry-international-jan-mar-2026>



Bulletin de l'Union des professeurs de physique et de chimie (« Le Bup »)

La Rédaction de *L'Actualité Chimique* a sélectionné pour vous l'article suivant :



N° 1082 (Mars 2026)

- Identification et quantification d'un colorant dans un liquide de refroidissement (partie 2 : pour aller plus loin...), par E. Tanguy, V. Autem, A. De Simone, J. Piard et R. Méallet

L'objectif de cet article, en complément du premier paru à ce sujet, est, outre quelques informations supplémentaires sur la fluorescéine, de fournir des détails sur son identification par spectroscopie d'absorption dans le domaine visible dans le liquide jaune de la marque Norauto®. Cette identification constitue une étape préalable et nécessaire à la quantification présentée dans l'article précédent.

- Présentation de trois devoirs thématiques en classe de seconde générale et technologique : Captain Tsubasa (animé), Dr Stone (manga) et The Big Bang Theory (série TV), par M. Fontaine

En seconde générale, nos classes sont souvent très hétérogènes : élèves avec des difficultés scientifiques, élèves se destinant à des études littéraires, élèves souhaitant passer un baccalauréat technologique, élèves ayant eu des professeurs de physique-chimie absents pendant le cycle 4... Afin de motiver nos élèves, j'ai fait le choix d'écrire ces dernières années trois sujets de DS thématiques sur des univers qu'ils apprécient : des mangas, des animés ou des séries TV ! Cet article présente les trois sujets donnés à mes élèves avant d'en tirer un bilan.

• [Sommaire complet, résumés des articles et modalités d'achat sur udppc.asso.fr](http://www.udppc.asso.fr)

9-10 avril 2026

12th edition of the French-Italian Chemistry Days

Nice

Voir *L'Act. Chim.* 508-509, p. 105.

<https://12-jfic-2026.sciencesconf.org>

24 avril 2026

FICS 2026

French industrial chemistry symposium

Paris

Voir *L'Act. Chim.* 508-509, p. 105.

<https://fics2024.sciencesconf.org>

5-7 mai 2026

FDFC 2026

10th International Conference on Fundamentals and Development of Fuel Cells and Electrolyzers

Montpellier

Voir *L'Act. Chim.* 507, p. 44.

<https://fdfc2026.sciencesconf.org>

18-21 mai 2026

GECat 2026

La Londe-les-Maures

Voir *L'Act. Chim.* 507, p. 50.

<https://gecat2026.sciencesconf.org>

18-22 mai 2026

GECOM-CONCOORD

Val-Joly

Voir *L'Act. Chim.* 510, p. 60.

<https://gecom26.sciencesconf.org>

18-22 mai 2026

SPECTRATOM 2026

Pau

<https://spectratom2026.sciencesconf.org>

19 mai 2026

6^e Journée RMN du Grand Sud

Bordeaux

<https://journeegrandsud.sciencesconf.org>

19-21 mai 2026

CBRNE Research & Innovation

7th International conference

Arcachon

<https://cbrneconference.fr>



28-29 mai 2026

JCS-2026

4^e Journées de Chimie Supramoléculaire
Marseille

Voir *L'Act. Chim.* 511, p. 69.

<https://jcs2026.sciencesconf.org>



8-11 juin 2026

R³C-2026

4^e Rencontres Rayonnement
RadioChimie

Orsay

Voir p. 69.

<https://r3c2026.sciencesconf.org>



18-19 juin 2026

JNOEJC 2026

20^e Journées Nord-Ouest Européennes des Jeunes Chercheurs

Le Havre

Voir p. 69.

<https://jnoejc2026.sciencesconf.org>



20-21 juin 2026

SCF 2026 Week-end grand public

Entre terre et océan :

la chimie qui façonne notre région

Bordeaux

Voir *L'Act. Chim.* 507, p. 51.

https://premc.org/fr/scf2026-fr/week-end_grand_public



22-24 juin 2026

Congrès SCF 2026

Les défis de la chimie de demain

Bordeaux

Voir p. 66.

<https://scf2026.fr>



29 juin-3 juillet 2026

Les Journées d'Électrochimie 2026

Nancy

Voir *L'Act. Chim.* 510, p. 60.

<https://je2026.sciencesconf.org>



5-8 juillet 2026

25th ICPC

International Conference on Phosphorus Chemistry

Montpellier

Voir *L'Act. Chim.* 510, p. 54.

<https://icpc25.sciencesconf.org>



12-16 juillet 2026

ECC10

10th EuChemS Chemistry Congress

Voir *L'Act. Chim.* 508-509, p. 106.

Anvers (Belgique)

<https://euchems2026.eu>



13-17 juillet 2026

ICCECRICE 2026

28th IUPAC International Conference on Chemistry Education & 17th EuChemS European Conference on Research in Chemical Education

Erzurum (Turquie)

<https://iccecrice2026.org>



30 août-4 septembre 2026

GECO 66

Groupe d'Études en Chimie Organique

La-Londe-les-Maures

Voir p. 70.

<https://geco66.sciencesconf.org>



13-15 octobre 2026

20^e Congrès de la Société Française de Génie des Procédés

Clermont-Ferrand

Voir *L'Act. Chim.* 511, p. 61.

www.sfgp2026.fr



27-29 octobre 2026

73^e Congrès national des professeurs de physique et de chimie

Bastia

www.udppc.asso.fr/congres



16-20 novembre 2026

Matériaux 2026

Grenoble

Voir p. 62.

<https://matériaux2026.org>





En direct de SCF 2026

Les divisions à l'honneur : une diversité scientifique inspirante

Dans le cadre du **congrès SCF2026**, le **Réseau Jeune de la Société Chimique de France (RJ-SCF)** et le **groupe Égalité** s'associent pour proposer une programmation riche et inspirante, mettant en lumière les enjeux actuels de la chimie, tant sur le plan scientifique que sociétal.

Conférenciers invités du RJ-SCF

- **Schirin Hanf** (Karlsruhe Institute of Technology, KIT, Allemagne), experte en chimie durable et innovation technologique.
- **Robin Weiss** (Université de Caen Normandie), expert en chimie verte et en catalyse.

Conférencière invitée du Groupe Égalité

- **Alessandra Quadrelli** (Université de Lyon et Institut de recherches sur la catalyse et l'environnement de Lyon, IRCELYON), experte en chimie verte et chimie organométallique.

Table ronde

Le RJ-SCF et le groupe Égalité coorganisent une table ronde sur le thème crucial de l'égalité femme-homme en chimie. Cet échange vise à identifier des leviers concrets pour promouvoir l'égalité dans les disciplines et les institutions, en s'appuyant sur des retours d'expérience et des expertises variées. Parmi les intervenants, ils accueilleront **Alessandra Quadrelli**.



Directrice de recherche au CNRS, Alessandra Quadrelli est une scientifique de tout premier plan, reconnue pour ses travaux en chimie durable et en valorisation du dioxyde de carbone. À travers ses recherches, elle contribue à relever des défis majeurs de notre époque, notamment la transition écologique et la transformation de nos modèles industriels vers des approches plus responsables et moins dépendantes des ressources fossiles. Son parcours illustre l'excellence scientifique, ainsi qu'un engagement constant en faveur d'une recherche innovante et utile à la société.

Mais son engagement ne s'arrête pas à la production scientifique. Alessandra Quadrelli a joué également un rôle important au sein des instances nationales d'évaluation et de pilotage de la recherche, où elle s'est investie particulièrement sur les questions de parité, de diversité et d'équité dans les carrières scientifiques. Avec ses collègues de l'ancienne section 14, elle a contribué à faire évoluer les pratiques d'évaluation, à interroger nos critères de reconnaissance et à promouvoir un environnement académique plus juste, attentif aux parcours et aux réalités individuelles [1].

Cette double perspective – celle d'une chercheuse engagée au plus haut niveau scientifique et celle d'une actrice impliquée dans les transformations institutionnelles – lui permet de porter un regard à la fois lucide, exigeant et constructif sur les enjeux d'égalité dans notre communauté.

Nous sommes donc particulièrement honorés de l'accueillir en tant que conférencière pour le groupe Égalité pour nourrir notre réflexion collective et identifier ensemble des leviers d'action concrets afin de faire progresser l'égalité dans nos disciplines et nos institutions. Ces réflexions permettront aussi de nourrir la table ronde sur les questions d'égalité coorganisée par le RJ-SCF et le groupe Égalité.

[1] Lire le rapport *Parité et évaluation non-discriminatoire au CNRS, 2021* : <https://hal.science/hal-03311372/file/Rapport-Parite-Evaluation-2021.pdf>

• Les biographies des intervenants sont consultables sur le site du congrès : <https://scf2026.fr>

Une année passe vite...

Pensez à votre adhésion

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

Fellows 2024/25

La promotion 2024-2025 des Fellows de Chemistry Europe a été annoncée fin février. Parmi les vingt-deux nouveaux membres distingués (voir p. 12), deux Français sont à l'honneur : les professeurs **Gilles Gasser** – laboratoire ICB (Inorganic Chemical Biology), Chimie ParisTech-PSL – et **Denis Jacquemin** – laboratoire CEISAM (Chimie et Interdisciplinarité, Synthèse, Analyse, Modélisation), Nantes Université.

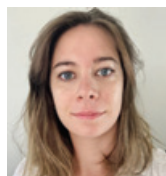
Chemistry Europe, qui regroupe seize sociétés issues de quinze pays européens (dont la SCF) et édite vingt revues, décerne ses Fellows tous les deux ans depuis 2015 afin de récompenser les membres des différentes sociétés pour « leurs contributions exceptionnelles à Chemistry Europe, incarnant l'excellence de la recherche, le soutien, la créativité et l'innovation. »

Les Fellows conservent leur titre à vie et contribuent à la renommée de Chemistry Europe, comme les lauréats du prix Nobel Ben Feringa, Jean-Marie Lehn et Sir Fraser Stoddart.

Les Fellows 2024/25 seront célébrés lors de la 10^e édition du congrès EuChemS, ECC10, à Anvers en juillet prochain.

• www.chemistryviews.org/fellows

Prescillia Lagarrigue, Travel Grant 2025 de Chemistry Europe



Les six lauréats des Chemistry Europe Travel Grants 2025 ont été annoncés début février. Parmi eux, Prescillia Lagarrigue, maîtresse de conférences depuis septembre 2023 au CIRIMAT, Université de Toulouse. « *Un grand merci à la Société Chimique de France et à*

Chemistry Europe pour leur confiance. Ce financement est une opportunité clé pour la poursuite de mes projets de recherche au CIRIMAT et l'établissement de nouvelles collaborations », a-t-elle écrit à l'annonce de ce prix. Félicitation à elle !

Prescillia Lagarrigue développe des matériaux fonctionnels (systèmes inorganiques, polymères et hybrides) à travers une approche synergique combinant synthèse, fonctionnalisation et mise en forme afin de concevoir des matériaux innovants aux structures et propriétés contrôlées.

Prix binationaux

Prix franco-chinois



• Ben Zhong Tang, Prix franco-chinois SCF 2025

Ben Zhong Tang occupe depuis 2021 une chaire de professeur et il est Doyen de la *School of Science and Engineering* à l'Université chinoise de Hong Kong, Shenzhen qu'il a rejoint dès 1994.

Ses recherches concernent essentiellement la science des matériaux, la chimie des polymères et la théranostique biomédicale. Il a développé le concept de l'émission induite par agrégation (« aggregation-induced emission », AIE) et son équipe diffuse largement cette thématique internationalement.

Chimie au féminin

Parcours, voix et engagements de femmes scientifiques



26 mars 2026
9h-13h
Amphithéâtre Charpak
Sorbonne Université
4 place Jussieu
75005 Paris

26 mars 2026
Chimie au féminin - Parcours, voix et engagements de femmes scientifiques
Paris

La Société Chimique de France organise « Chimie au féminin », une matinée consacrée à la mise en lumière de parcours féminins inspirants dans les sciences chimiques. Cet événement s'inscrit dans une dynamique plus large portée par la SCF, qui agit pour une meilleure représentation des femmes dans le domaine de la chimie, notamment par différentes actions :

- La création, en juillet 2023, du groupe thématique Égalité,
- La participation au projet d'inscription de 72 femmes de sciences sur la tour Eiffel,
- La publication de ce numéro de *L'Actualité Chimique*, dédié aux femmes chimistes.

• Programme et inscriptions : <https://new.societechimiquedefrance.fr/chimie-au-feminin>

Membre de la Chinese Academy of Sciences et de plusieurs autres académies et institutions (World Academy of Sciences for the Advancement of Science in Developing Countries, Asia Pacific Academy of Materials, International Union of Societies for Biomaterials Science and Engineering, American Institute for Medical and Biological Engineering), il a reçu de nombreuses distinctions, notamment Tang Aoqing Chemistry Award (2026), CCS, SINOPEC Award (2024), Biomaterials Global Impact Award (2023).

Auteur de plus de 2 500 articles de recherche qui ont été cités plus de 250 000 fois, il a donné plus de 500 conférences internationales, a déposé plus de 450 brevets – dont 28 avec transfert technologique –, est éditeur en chef de la revue *Aggregate* publiée par Wiley, et il participe aux bureaux éditoriaux d'une vingtaine de journaux scientifiques.

Ben Zhong Tang a développé de nombreuses collaborations avec des équipes françaises depuis plus de quinze ans, notamment à Sorbonne Université et PSL (ESPCI).



• Paolo Samorì, Prix franco-chinois CCS 2026

C'est avec plaisir que nous vous annonçons le Prix franco-chinois 2026 attribué par la *Chinese Chemical Society* (CCS) à Paolo Samorì. Spécialiste reconnu internationalement des nanosciences, des nanotechnologies et de l'électronique organique, Paolo Samorì a débuté sa carrière de chercheur à l'Université de Bologne (Italie). En 2008, il est nommé membre senior de l'Institut de science et d'ingénierie supramoléculaires (ISIS) de l'Université de Strasbourg et directeur du Laboratoire de Nanochimie. Membre senior de l'Institut universitaire de France et de plusieurs académies des sciences européennes, il est l'actuel directeur de l'ISIS. Depuis le tout début de sa carrière, il s'est vu décerner un nombre impressionnant de distinctions, dont la Médaille d'argent du CNRS en 2012, le Grand Prix Pierre Süe de la SCF en 2018 et le *ERC Advanced Grant* en 2019. Auteur de plus de 520 articles dans des revues internationales, donnant lieu à quelque 37 000 citations, il a donné plus de 200 conférences plénières ou invitées lors de congrès internationaux. Impliqué dans de nombreux projets européens et nationaux, il entretient des coopérations scientifiques privilégiées avec la Chine depuis de nombreuses années, étant notamment membre honoraire de l'Université de Shanghai Jiao Tong depuis 2018.

Prix des entités

Chémobiologie : chimie et vivant

Prix JCJC 2026

(Jeunes Chercheurs et Jeunes Chercheuses)



• Sarah Hostachy

Sarah Hostachy mène ses recherches au sein du laboratoire SyMMES (UMR 5819) au CEA-Grenoble. En 2015, elle a obtenu un doctorat en chimie moléculaire de l'Université Pierre et Marie Curie (Paris), sous la direction de Clotilde Policar et Nicolas Delsuc, pour le développement de complexes métalliques pour l'imagerie multimodale de protéines dans les cellules. Elle a ensuite rejoint le groupe de Dorothea Fiedler (FMP, Berlin), où elle s'est intéressée au développement d'outils moléculaires pour interroger le rôle des inositols polyphosphates en biologie. Depuis son recrutement en 2020 au sein du laboratoire SyMMES, ses recherches se concentrent sur le développement d'outils chémobiologiques pour étudier les interactions entre métaux et vivant, et en particulier les interactions métal-protéines.

• www.symmes.fr/Pages/Portrait/Sarah-Hostachy.aspx

Prix de thèse 2026



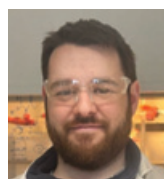
• Laurane Michel

Laurane Michel a effectué son doctorat à l'Institut de Chimie des Substances Naturelles (ICSN, CNRS, UPR 2301, Université Paris-Saclay) sous la supervision d'Arnaud Chevalier.

Après avoir obtenu son diplôme d'ingénieure en chimie avec une spécialité en chimie organique à l'Université de Strasbourg en 2021, et, parallèlement, un Master en chimie moléculaire et supramoléculaire, son grand intérêt pour les projets interdisciplinaires l'a conduite à réaliser son doctorat à l'ICSN. Son projet de thèse a porté sur la génération de nouvelles stratégies thérapeutiques pour impacter les fonctions mitochondriales. Elle a notamment travaillé sur la synthèse de sondes fluorogéniques permettant la visualisation d'une activité azoréductase intramitochondriale en condition de normoxie. Elle a ensuite synthétisé et évalué plusieurs plateformes chimiques tripartites mito-ciblées activables enzymatiquement par des activités réductases mitochondriales afin de permettre la libération intra-mitochondriale de molécules neutres, dans le but ultime de permettre le transport de principes actifs puis leur libération sélective à l'intérieur de la mitochondrie. Enfin, elle a abordé la synthèse d'une nouvelle bibliothèque de photosensibilisants mito-ciblés pour une utilisation en thérapie photodynamique. Depuis avril 2025, elle réalise un postdoctorat en Suisse à l'Université de Genève, dans l'équipe de Sascha Hoogenboom, sur la synthèse et l'évaluation biologique de PROTAC photoprotégés afin de comprendre le fonctionnement de la voie Hedgehog dans les cils cellulaires.

Section Champagne-Ardenne

Prix de thèse SCF-CA 2025



• Rémi Pereira

Rémi Pereira est lauréat du 1^{er} prix de thèse SCF-Champagne-Ardenne. Il a effectué ses études doctorales sous la direction d'Emmanuel Riguet et Fabienne Grellepois à l'Institut de Chimie Moléculaire de Reims (UMR 7312 CNRS-URCA). Ses travaux ont porté sur l'étude de nouvelles approches catalytiques énantiosélectives pour la synthèse de molécules polycycliques complexes possédant un stéréocentre quaternaire. Il effectue actuellement un stage postdoctoral dans l'équipe de Jean-François Brière à l'Institut CARMEN (Institut de chimie analytique et réactivité moléculaire en Normandie, UMR 6064).

Section Provence-Alpes-Côte d'Azur

Grand Prix SCF Sud PACA 2026

• Pour suivre les actualités de la section Sud PACA :

https://new.societechimiquedefrance.fr/sections_regionales/provence-alpes-cote-dazur



• Laurence Charles

Laurence Charles est professeure de chimie à Aix Marseille Université depuis 2005 et exerce ses activités de recherche au sein de l'Institut de Chimie Radicalaire (ICR, UMR 7273), où elle anime une équipe de sept chercheurs en spectrométrie de masse, RMN et RPE.

Spécialiste de spectrométrie de masse, ses travaux associent une activité de recherche fondamentale, menée sur l'ionisation et les mécanismes de fragmentation des polymères synthétiques, à des projets appliqués à la caractérisation structurale de macromolécules à architecture complexe. Depuis 2015, elle développe des méthodes de séquençage MS/MS pour lire les informations encodées dans le squelette de

polymères numériques conçus pour l'archivage de données. Co-lauréate avec Didier Gignes (ICR, Marseille) et Jean-François Lutz (ISIS, Strasbourg) du Prix Innovation Académique décerné en 2024 par le Groupe Français d'Études et d'Applications des Polymères (GFP) et lauréate du Prix Chercheuse Confirmée de la division Chimie physique en 2025 (voir *L'Act. Chim.* octobre 2025, p. 49), Laurence Charles est auteure de près de 200 articles et deux brevets.

Prix de thèse SCF Sud PACA 2026



• Blanche Krieguer

Blanche Krieguer a réalisé sa thèse au sein de l'Institut de Chimie Radicalaire (ICR) et de l'Institut Méditerranéen de Biodiversité et d'Écologie marine (IMBE) d'Aix-Marseille Université, en collaboration avec la société Sartorius. Ses recherches ont porté sur l'impact des rayonnements ionisants sur les matériaux polymères. L'étude des interactions entre les matériaux et les rayonnements apparaît comme un enjeu majeur pour optimiser et diversifier les procédés de stérilisation des matériaux polymères pour systèmes à usage unique. Les résultats obtenus ont démontré l'équivalence des trois technologies d'irradiation (rayons gamma, rayons X et faisceaux d'électrons) sur un large éventail de matériaux à différentes échelles. Ce travail a fourni aux industriels des données fiables pour optimiser les procédés de stérilisation et accompagner la transition vers des technologies alternatives. La société Sartorius prévoit ainsi d'implémenter la stérilisation par rayons X en 2026. Blanche Krieguer est actuellement attachée temporaire enseignement recherche (ATER) à Aix-Marseille Université.

Appels à candidatures

Prix 2026 de la division Chimie physique

La division de Chimie physique (DCP) lance un appel à candidatures pour ses prix 2026 de Thèse, de Jeune Chercheuse/Jeune Chercheur, de Chercheuse Confirmée/Chercheur Confirmé et Instrumentation & Innovation (qui récompense une personne ou une équipe ayant réalisé un développement instrumental ou méthodologique ayant permis une percée importante dans un domaine de la Chimie Physique). Les lauréat-es seront invité-es à présenter leurs travaux dans *L'Actualité Chimique*.

Certaines subdivisions et les groupes thématiques de la DCP ont aussi lancé des appels pour leurs prix (voir ci-dessous).

• **Candidatures à envoyer jusqu'au 15 avril 2026.**

<https://new.societechimiquedefrance.fr/divisions/chimie-physique/prix-dcp-2026>

Prix Jeune Chercheuse et Prix Jeune Chercheur en électrochimie 2026

La subdivision Électrochimie de la DCP et la section française de l'*International Society of Electrochemistry* (ISE) ouvrent un appel à candidature pour un prix Jeune Chercheuse et un prix Jeune Chercheur. Les prix seront remis lors des Journées d'Électrochimie qui auront lieu à Nancy du 29 juin au 3 juillet 2026.

Cet appel s'adresse aux jeunes chercheurs et chercheuses francophones (30 à 41 ans, âge modulable si congés maternité/paternité), membres des deux sociétés et engagés dans une carrière académique (maitresse/maitre de conférences,

chargée/chargé de recherches etc.) ou une carrière industrielle en électrochimie.

• **Candidatures à envoyer jusqu'au 22 mai 2026.**

<https://new.societechimiquedefrance.fr/divisions/electrochimie/prix-jeune-chercheuse-f-et-jeune-chercheur-m-en-electrochimie-2026>

Prix de Thèse SP2P 2026

La subdivision Photochimie, Photophysique et Photosciences de la DCP va décerner son prix de Thèse 2026 à un de ses membres ayant soutenu sa thèse au cours de l'année 2025.

• **Candidatures à envoyer jusqu'au 31 mars 2026.**

<https://new.societechimiquedefrance.fr/divisions/photochimie-photophysique-et-photosciences/prix-de-these-sp2p>

Prix de Master en chimie du RJ-SCF section Normandie 2026

Le RJ-SCF section Normandie vient de lancer la première édition du Prix de Master en chimie, récompensant un(e) étudiant(e) de Master 2 pour les efforts investis pendant son stage avec un prix de 100 € et l'opportunité de présenter ses travaux lors de la JNOEJC au Havre (voir ci-après).

Éligibilité : avoir réalisé son stage de Master 2 en 2026 dans le domaine de la chimie en Normandie ; avoir l'accord des encadrants de stage de Master 2 ; être membre de la SCF (gratuit pour les Master : <https://new.societechimiquedefrance.fr/adherer-a-la-scf>)

• **Candidatures (résumé des travaux, deux pages max., lettre de recommandation du directeur de stage, preuve d'adhésion à la SCF) à envoyer jusqu'au 22 mai 2026 à bureau-rj-normandie@societechimiquedefrance.org**

Manifestations

8-11 juin 2026

R³C-2026

4^e Rencontres Rayonnement RadioChimie

Orsay

Après trois premières éditions en 2018 à Strasbourg, en 2022 à Nice et en 2024 à Nîmes, la subdivision Chimie sous Rayonnement RadioChimie (DCP/CRRC) organise ses 4^e Rencontres R³C à l'Université Paris-Saclay (Orsay).

Les conférences porteront sur la chimie sous rayonnement, la chimie des radioéléments, la radiobiologie et la santé, les grands instruments et les installations, les applications industrielles, le cycle combustible, l'environnement, les études de terrain.

Les participants qui le souhaitent pourront participer à des visites groupées d'instruments : les irradiateurs du Laboratoire des rayonnements appliqués (LABRA) et/ou l'accélérateur linéaire d'électrons ALIENOR (NIMBE) au CEA Saclay ; la ligne de lumière PLEIADES du synchrotron SOLEIL ; Sciences ACO, le premier Anneau de Collision devenu musée de la lumière et de la matière d'Orsay ; et MOSAIC, la plateforme d'irradiation et d'implantation ionique de l'IJCLab'.

• **Date limite de soumission des résumés : 31 mars 2026.**

<https://r3c2026.sciencesconf.org>

18-19 juin 2026

JNOEJC 2026

20^e Journées Nord-Ouest Européennes des Jeunes Chercheurs

Le Havre

Le JNOEJC, organisé chaque année entre les régions Normandie et Hauts-de-France, constitue un moment privilégié de rencontre pour la communauté locale des chimistes. Il offre aux jeunes chercheurs (étudiants de Master 2, doctorants et postdoctorants) l'opportunité de présenter leurs travaux dans différents domaines de la chimie organique, de la chimie du solide, analytique et de la chimie des polymères et des sciences des matériaux.

L'événement accueillera également quatre conférenciers plénières renommés, issus du milieu académique et industriel. Leurs interventions rythmeront les deux journées et favoriseront une dynamique collective entre les universités partenaires. Une large partie du programme sera consacrée aux communications des jeunes chercheurs (masters, doctorants et postdoctorants).

• **Date limite de soumission des résumés : 17 mai 2026.**

<https://jnoejc2026.sciencesconf.org>

30 août-4 septembre 2026

GECO 66

66^e édition du Groupe d'Études en Chimie Organique

La Londe-les-Maures



Le Groupe d'Études en Chimie Organique (GECO) a été créé en

1959 sous l'impulsion du Professeur Guy Ourisson. Cette idée lui a été inspirée par l'équivalent américain de cette manifestation scientifique, les prestigieuses « Gordon Research Conferences » auxquelles il participa dans les années 1950.

Ce congrès annuel d'envergure internationale est un moment privilégié pour la communauté des chercheuses/chercheurs et enseignants chercheurs/enseignantes chercheuses en chimie organique au sens large. Il rassemble chaque année, pendant une semaine et sur site choisi à travers toute la France, entre 50 et 80 chimistes professionnels (académiques et industriels, français et étrangers) autour d'une douzaine de conférencières et conférenciers invités prestigieux et de communications orales.

Le GECO 66 accueillera Lutz Ackermann (Göttingen University), Philippe Belmont (Université Paris Cité), Olivier Chuzel (Aix Marseille Université), Morgan Donnard (Université de Strasbourg, CNRS), Amandine Guérinot (ESPCI), Véronique Gouverneur (University of Oxford), John F. Hartwig (University of California, Berkeley), Syuzanna Harutyunyan (University of Groningen), Debabrata Maiti (ITT Bombay), Ilan Marek (Technion University), Camille Oger (Université de Montpellier), Francesca Paradisi (University of Bern), Kurt Puentener (Hoffmann La Roche) et Anis Tlili (Université de Lyon, CNRS).

Les thèmes abordés au cours du GECO sont très variés et allient la recherche fondamentale et ses applications en réponse aux défis sociétaux (santé, nutrition, énergie, environnement). Ils incluent systématiquement la synthèse de molécules naturelles et d'analogues, la catalyse, l'étude de nouvelles réactions chimiques et de nouvelles approches technologiques, l'étude de nouveaux modes d'interactions à l'échelle moléculaire et supramoléculaire, l'application de la chimie organique à la biologie, au développement de nouveaux matériaux et à l'énergie. Le concept de développement durable est également une constante des travaux qui sont présentés.

• <https://geco66.sciencesconf.org>



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

Les carbènes (alkyles)(amino) cycliques énantiomériquement purs

Une architecture 3D chirale innovante pour la catalyse asymétrique

Fanny MORVAN, Meng LIU, Nicolas VANTHUYNE, Rodolphe JAZZAR et Marc MAUDUIT

<https://doi.org/10.63133/scf.act-chim.2026.512.01>

Les CAAC, une richesse architecturale et une ambivalence électronique remarquable !

Découverts en 2005 par le groupe de Bertrand, les Carbènes (Alkyles)(Amino) Cycliques (ou CAAC) ne cessent de nous surprendre par les possibilités synthétiques qu'offre cette famille de ligands ancillaires aux chimistes de synthèse [1]. Se distinguant des célèbres DiAminoCarbènes cycliques (ou DAC) par la présence d'un carbone quaternaire à la place d'un des deux atomes d'azote, les CAAC démontrent des propriétés électroniques tout à fait remarquables associées à une architecture 3D très différenciante [2]. En effet, si les DAC présentent un encombrement autour du métal pouvant s'apparenter à un parapluie, le carbone quaternaire présent chez les CAAC forme, quant à lui, un mur de protection conférant une stabilité accrue à l'espèce métallique active (figure 1). Au niveau électronique, contrairement aux DAC dont le carbone divalent associe une forte σ -donation et une faible π -acceptation, les CAAC arborent une ambiphilicité accrue avec une σ -donation exacerbée, mais également un caractère π -accepteur très prononcé les rendant à la fois plus nucléophiles et plus électrophiles. Cette ambivalence est à l'origine des propriétés remarquables que confèrent les CAAC aux métaux de transition, notamment en métathèse des oléfines catalysée par le ruthénium [3].

Les débuts des CAAC chiraux en catalyse asymétrique : du pool chiral à la résolution des complexes métalliques par chromatographie chirale à l'échelle préparative !

La synthèse stéréosélective de synthons organiques chiraux originaux est cruciale pour la découverte de nouveaux médicaments, produits agrochimiques et matériaux. Cette tendance repose sur le fait que la plupart des molécules actives actuellement sur le marché sont chirales, comme l'illustre la récente commercialisation du lénacapavir, une molécule chirale synthétique présentant une efficacité remarquable contre le VIH. Dans ce contexte, la catalyse asymétrique par métaux de transition, intégrant des considérations de durabilité, est particulièrement attractive : énantio-puretés élevées, fortes chimio- et régiosélectivités, économie d'atomes et réduction des déchets. Malgré les avancées remarquables réalisées dans ce domaine au cours des dernières décennies, de nombreux défis restent à relever afin d'assurer une mise en œuvre rapide à l'échelle industrielle : éviter autant que possible l'utilisation de métaux de transition nobles (et toxiques) ; recourir à des architectures de ligands chiraux moins coûteuses ; réduire la charge catalytique ; limiter les déchets issus des réactifs et des additifs ; concilier les exigences économiques avec les préoccupations environnementales. Ainsi, le développement de nouvelles architectures tridimensionnelles pour les ligands chiraux demeure fortement recherché. Si les CAAC se sont rapidement imposés comme des ligands incontournables en catalyse, remettant non seulement en question la domination des phosphines et des DAC mais permettant également la découverte de nouvelles réactions impliquant notamment le cuivre, l'or ou l'argent, ce n'est qu'en 2019

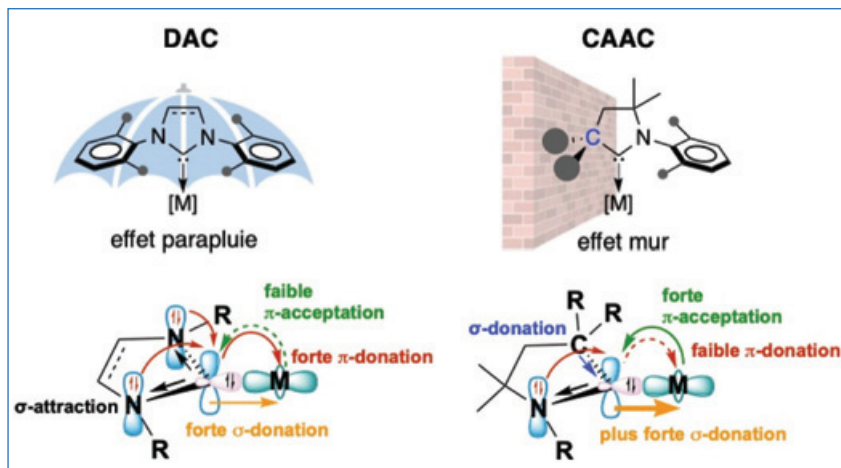


Figure 1 - Architecture 3D et propriétés électroniques des CAAC.

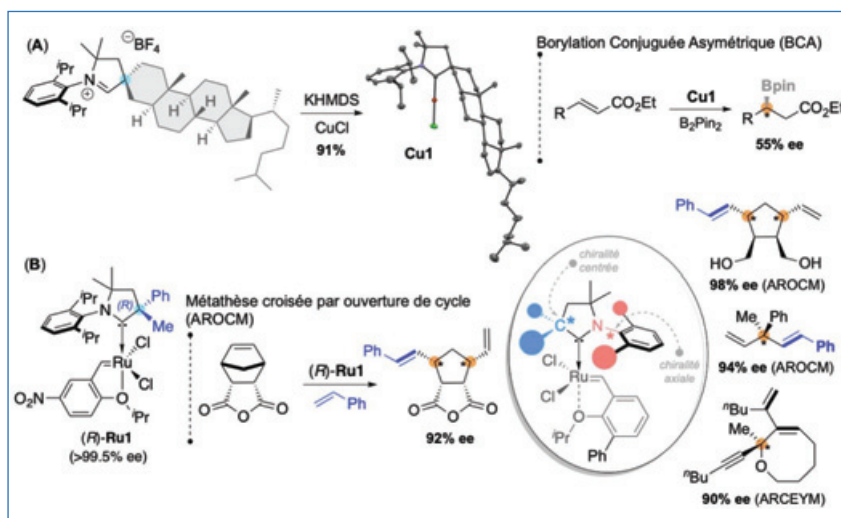


Figure 2 - Les débuts des CAAC chiraux en catalyse asymétrique via (A) le « pool chiral » et (B) la résolution chirale de complexes racémiques.

que la première utilisation en catalyse asymétrique a été décrite conjointement par les groupes de Bertrand, Jazzar et Mauduit [4]. Synthétisés en six étapes à partir du 5 α -cholestan-3-one, un dérivé stéroïdien commercial dérivé du coprostanol, le complexe CAAC de cuivre énantio-pur **Cu1** résultant s'est illustré pour la première fois en réaction de borylation conjuguée asymétrique où des excès énantio-mériques (ee) allant jusqu'à 55 % ont été observés [4]. Fort de ce résultat prometteur, nous avons par la suite porté notre attention sur le développement des premiers complexes CAAC de ruthénium chiraux mettant en jeu une résolution par chromatographie chirale à l'échelle préparative [5]. Avantagusement, cette méthodologie permet d'isoler chaque énantiomère des complexes avec de très bons rendements et d'excellentes puretés énantio-mériques (> 99 %). Ces complexes se sont avérés très performants en métathèse asymétrique des oléfines avec des énantiosélectivités allant jusqu'à 92 % ee (figure 2), illustrant de nouveau le potentiel des CAAC chiraux en

catalyse asymétrique [5]. De récents développements au laboratoire ont mis en évidence la diversité structurale qu'offrent les CAAC pour optimiser le transfert de chiralité en métathèse [6]. Ainsi, en combinant la chiralité centrée (*via* le carbone quaternaire) à une chiralité axiale (*via* le fragment *N*-arylique), des énantiosélectivités allant jusqu'à 99 % ee en métathèse croisée asymétrique par ouverture de cycle (AROCM) ont été obtenues. Ces nouveaux complexes se sont également avérés très performants en métathèse d'ène-yne cyclisante asymétrique (ARCEYM) où un excès énantiomérique de 90 % a pu être atteint, un record pour des complexes de ruthénium.

Accès aux sels d'aldiminium énantiomériquement purs : vers la polyvalence des CAAC chiraux en catalyse asymétrique

Si la résolution chirale par chromatographie à l'échelle préparative s'est avérée efficace pour de nombreux complexes CAAC métalliques (Ru, Rh, Au, Cu), cette méthodologie reste inadéquate pour les complexes instables sur silice, par exemple les complexes d'iridium. Afin de contourner cette limitation, nous avons porté notre attention sur la résolution chirale de pyrrolidines, intermédiaires clés obtenus par simple réduction des sels d'aldiminium précurseurs des CAAC (figure 3). De manière intéressante, la résolution peut s'effectuer aisément à l'échelle du décagramme, avec des rendements le plus souvent quantitatifs et de très hautes puretés énantiomériques (> 99 %). Après une oxydation en présence de dibrome suivie d'une métathèse anionique, les sels d'aldiminium désirés sont isolés avec d'excellents rendements [7]. À titre d'illustration, le complexe (S)-Ir1, synthétisé à partir d'un sel d'aldiminium énantiopur, s'est avéré très performant en hydrogénation asymétrique d'alcools allyliques où de très bonnes énantiosélectivités ont été obtenues (jusqu'à 86 % ee) [8].

Réactivité des CAAC chiraux : vers un accès rapide à des briques moléculaires contenant des atomes stéréogéniques de phosphore ou de silicium

Les unités stéréogéniques sont au cœur de la complexité des molécules. Si l'on sait depuis longtemps contrôler la stéréochimie autour du carbone, les chimistes cherchent désormais à étendre ce contrôle à d'autres éléments comme le silicium ou le phosphore, une tâche bien plus ardue et pourtant nécessaire au développement de nouveaux médicaments. C'est le cas, par exemple, du remdesivir, un médicament utilisé pour traiter la Covid-19, qui contient un atome de phosphore dit « P-stéréogénique » (figure 4). Récemment, nous avons découvert que les CAAC chiraux permettaient d'activer des liaisons chimiques typiquement inertes, notamment les liaisons E-H (E = C, N, O, Si, P), autorisant l'introduction de centres chiraux sur des atomes autres que le carbone, comme le phosphore ou le silicium, avec une très haute stéréosélectivité (> 95 % d.r.) [7]. Cette découverte ouvre ainsi la voie à la conception de nouvelles molécules chirales, potentiellement utiles dans le domaine pharmaceutique. Ces résultats sont d'autant plus attrayants que ces transformations s'effectuent sans avoir recours à des métaux souvent coûteux ou toxiques. Les CAAC se comportent alors comme de véritables « imitateurs » de métaux, tout en étant plus simples, plus durables et plus modulables.

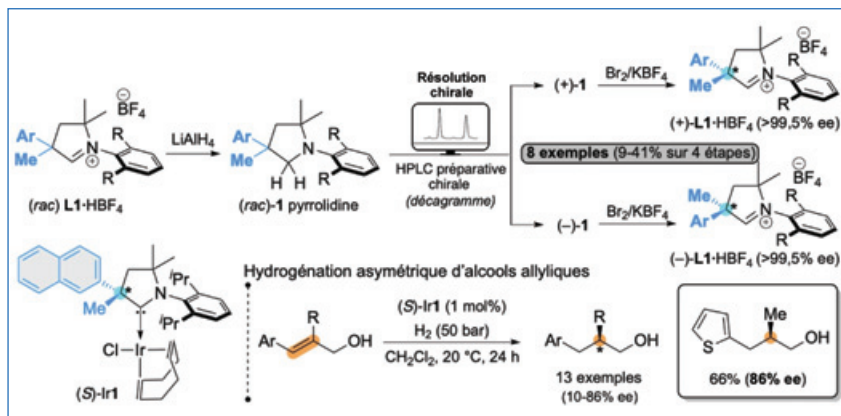


Figure 3 - Synthèse des sels d'aldiminium énantiomériquement purs, précurseurs des CAAC, et application en hydrogénation asymétrique catalysée par un CAAC d'iridium.

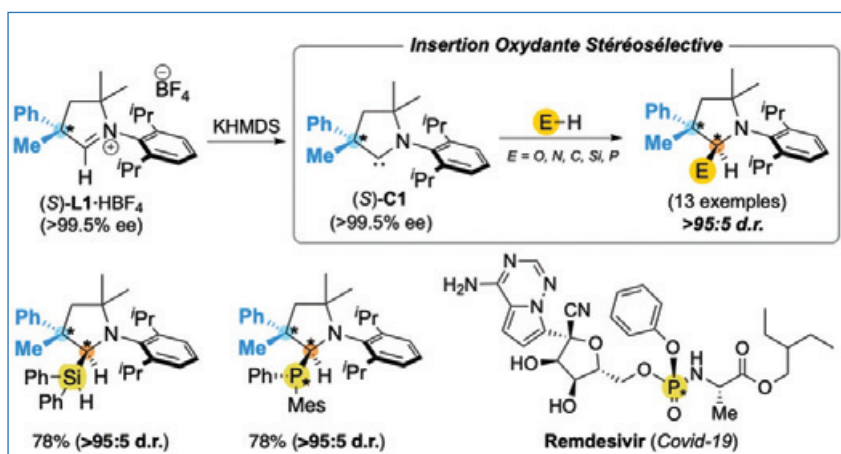


Figure 4 - Réactivité des CAAC chiraux : insertion oxydante stéréosélective des liaisons chimiques typiquement inertes. d.r. : ratio diastéréomérique.

Ces travaux pionniers ont mis en lumière le potentiel des CAAC chiraux en catalyse asymétrique. Leur future commercialisation (courant 2026) permettra d'étendre leur potentiel en catalyse et notamment à travers le développement de nouvelles réactions pour construire des molécules chirales toujours plus complexes, garantes des médicaments de demain.

- [1] a) V. Lavallo *et al.*, *Angew. Chem. Int. Ed.*, **2005**, *44*, p. 5705-9, <https://doi.org/10.1002/anie.200501841>; b) R. Jazzar *et al.*, *Angew. Chem. Int. Ed.*, **2007**, *46*, p. 2899-902, <https://doi.org/10.1002/anie.200605083>
- [2] R. Jazzar, M. Soleilhavou, G. Bertrand, *Chem. Rev.*, **2020**, *120*, p. 4141-68, <https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.0c00043>
- [3] J. Morvan, M. Mauduit, G. Bertrand, R. Jazzar, *ACS Catal.*, **2021**, *11*, p. 1714-48, <https://doi.org/10.1021/acscatal.0c05508>
- [4] D. Pichon *et al.*, *Chem. Sci.*, **2019**, *10*, p. 7807-11, <https://doi.org/10.1039/C9SC02810B>
- [5] J. Morvan *et al.*, *J. Am. Chem. Soc.*, **2020**, *142*, p. 19895-901, <https://doi.org/10.1021/jacs.0c10705>
- [6] M. Liu *et al.*, *JACS Au*, **2025**, *2*, p. 5170-83, <https://doi.org/10.1021/jacsau.5c01098>
- [7] J. Lorkowski *et al.*, *J. Am. Chem. Soc.*, **2025**, *147*, p. 14777-84, <https://doi.org/10.1021/jacs.5c03845>
- [8] F. Morvan *et al.*, *ChemistryEurope*, **2026**, *4*, e202500268, <https://doi.org/10.1002/ceur.202500268>

Cette fiche a été préparée par **Fanny MORVAN**¹, ancienne doctorante, et **Meng LIU**¹, postdoctorant, ayant travaillé sur ce projet, **Nicolas VANTHUYNE**², ingénieur de recherche, **Rodolphe JAZZAR**^{1,3}, directeur de recherche, et **Marc MAUDUIT**¹, directeur de recherche (marc.mauduit@ensc-rennes.fr).

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

¹ Univ. Rennes, École Nationale Supérieure de Chimie de Rennes, CNRS, Institut des Sciences Chimiques de Rennes.

² Chiropole, AMU, CNRS.

³ ReactLab, San Diego State University.

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	<input type="checkbox"/> 170€	<input type="checkbox"/> 210€	<input type="checkbox"/> 225€
Institutions	<input type="checkbox"/> 340€	<input type="checkbox"/> 380€	<input type="checkbox"/> 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 :

- 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 €
- La production d'hydrogène décarboné (octobre 2021) : 20 €
- De la chimie du solide aux batteries de demain (juillet-août 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 acquittée

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

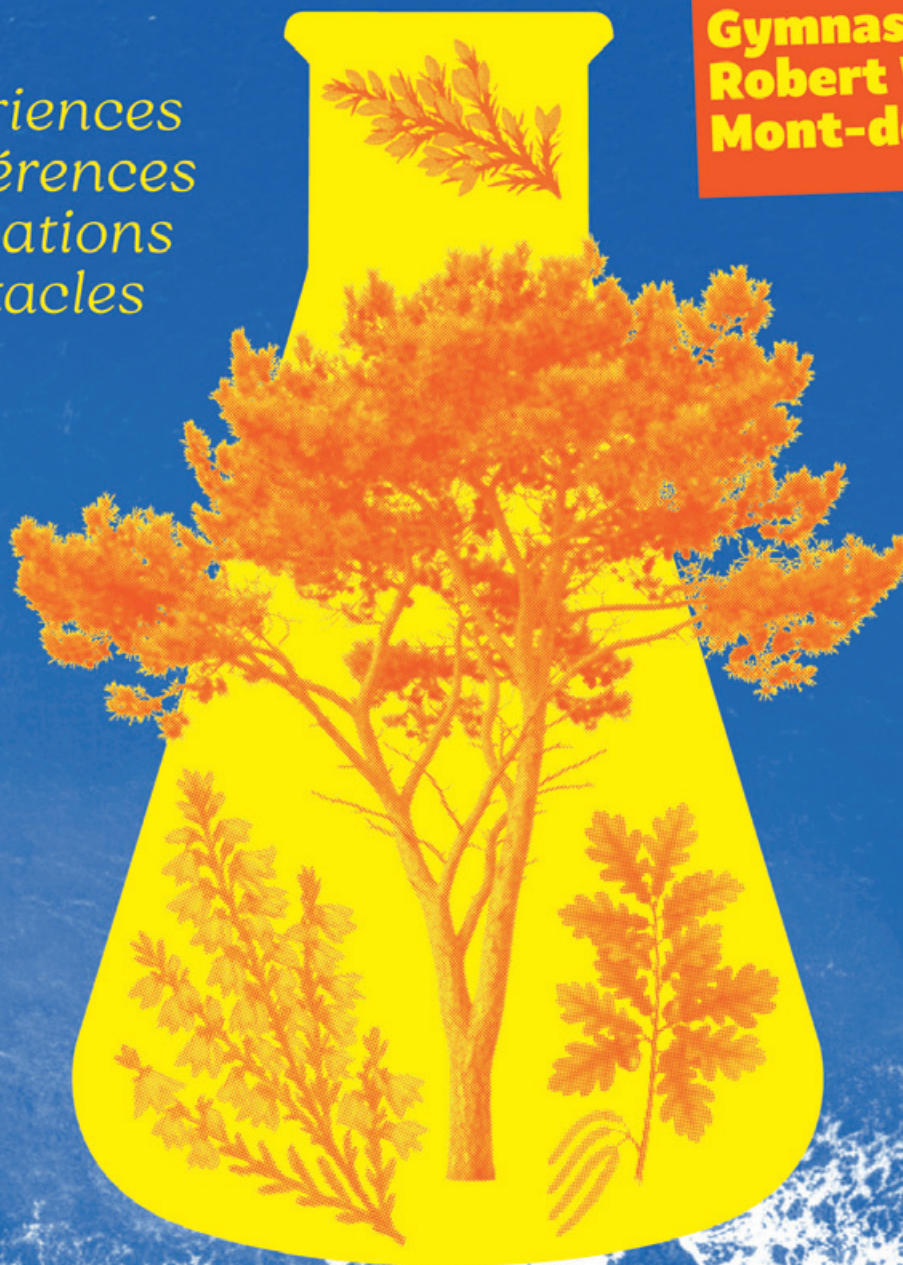
CHIMIE & TERROIR

Osez l'expérience

DU 28
AU 30
MAI
2026

*Expériences
Conférences
Animations
Spectacles*

**Gymnase du lycée
Robert Wlérick
Mont-de-Marsan**



**ENTRÉE
LIBRE &
GRATUITE**

**SCOLAIRES
SUR INSCRIPTION**
28-29 MAI | 9H-16H30

TOUT PUBLIC
28-29 MAI 16H-18H
30 MAI 10H-17H