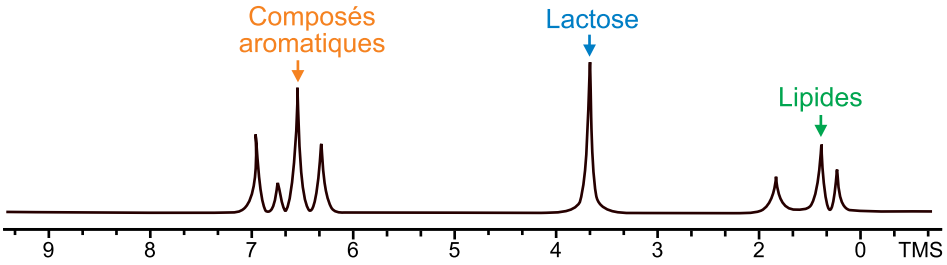
N° 520 - NOVEMBRE 2026

l'actualité chimique

LE JOURNAL DE LA SOCIÉTÉ CHIMIQUE DE FRANCE



Spectre RMN ^{1}H typique du lait

- Composés aromatiques (≈ 6-9 ppm)
- Lactose (≈ 3-5 ppm)
- Lipides (≈ 0-3 ppm)



CONTRÔLER L'AUTHENTICITÉ BIOLOGIQUE DU LAIT

JEUNES CHIMISTES À L'HONNEUR

LA SCF EN MOUVEMENT

Union des professeurs de physique et de chimie

Une association d'enseignants au service des enseignants

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



Université d'été Espace éducation
(Toulouse : 29 juin au 3 juil. 2026)



Journée interacadémique
(3 juillet 2025)



Les membres
du bureau académique

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

l'actualité chimique

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

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

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

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

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

COMMUNICATION
SCF, Olivia Pradel
communication@societechimiquedefrance.fr

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

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

ISSN version papier 0151 9093
ISSN version électronique 2105 2409

© SCF 2026 – Tous droits de reproduction réservés
Dépôt légal : novembre 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.



La chimie à l'honneur

À l'heure où nous préparions ce nouveau numéro de *L'Actualité Chimique*, nous apprenions avec une grande joie l'attribution du prix Nobel de chimie 2026 à notre collègue Henri Kagan de l'Université Paris-Saclay, conjointement avec le professeur Kenso Soai de l'Université des sciences de Tokyo, pour leurs découvertes sur les effets non linéaires et l'autocatalyse en synthèse organique asymétrique. Nous aurons l'occasion de vous proposer des articles sur les travaux et le parcours de ces éminents chimistes dans le prochain numéro. Notons que le nom d'Henri Kagan est déjà présent dans nos pages avec les deux articles consacrés aux travaux des récipiendaires du Prix de thèse Henri Kagan 2025 de la division Chimie Organique de la SCF, accompagné d'autres jeunes chimistes talentueux.ses également mis.es à l'honneur.

Est-il bio le débit de lait ?

En ce mois de novembre, où d'aucuns attendent de célébrer un breuvage à la mode alcoolisé et rouge, *L'Actualité Chimique* s'intéresse au lait. Mais le lait bio ! s'il vous plaît. Où vous verrez qu'allier chimie analytique, spectroscopie de résonance et intelligence artificielle permet de distinguer lait biologique et lait conventionnel, pour savoir ce que l'on boit. Le lien entre chimie et aliments ou bioressources, c'est aussi l'idée directrice des manifestations « Chimie et Terroir » qui ont parcouru la France métropolitaine pour initier un large public à notre discipline.

De jeunes chimistes récompensé.es

Comme annoncé en préambule, nous accueillons des articles de jeunes chimistes dont les travaux ont été récompensés par plusieurs divisions de la SCF. Un article fait un point sur les carbènes hétérocycles, posant une question qui touche tous les scientifiques. En tant qu'outils performants pour la catalyse, sont-ils le fruit d'une inspiration par la nature ou bien une invention ? Toujours en catalyse, des alternatives durables aux catalyseurs à base de palladium pour des réactions d'oxydation en milieu homogène sont discutées. D'alternative, il en est aussi question dans un article consacré aux alcynes-SF_5 qui suscitent un regain d'intérêt car moins « éternels » que les controversés PFAS. La photochimie et la photocatalyse sont en plein essor en vue d'optimiser l'efficacité des synthèses organiques en conditions douces. Nous en apprendrons plus sur de nouvelles applications du supersilane pour photo-activer les précurseurs halogénés organiques. La photo-activation de molécules est aussi au cœur de la thérapie photodynamique qui nous est présentée comme approche ciblée pour le traitement des métastases du cancer de l'ovaire.

Une communauté de chimistes dynamique

L'Actualité Chimique se veut le reflet de la richesse et de la diversité d'acteurs du domaine de la chimie, comme une vitrine de la Société Chimique de France. Mieux faire connaître la Société Chimique de France, montrer ses actions et inciter à la rejoindre, c'était l'enjeu de la réflexion menée par les entités de la SCF au cours du congrès de Bordeaux de juin 2026. Nos pages rapportent les conclusions de ces travaux, importants pour les années à venir. Et dans nos rubriques, à découvrir, la (jeune) chimie française qui se positionne en Europe, une contribution de la chimie aux technologies quantiques, de nouveaux principes pharmaceutiques, les enjeux de formation liés à la chimie verte et à la transition environnementale, ainsi que beaucoup d'ouvrages et revues à consulter, qui n'ont pas l'odeur d'acroléine.
Bonne lecture !

Pierre Rabu,
Rédacteur en chef

sommaire

N° 520 - NOVEMBRE 2026

ÉDITORIAL 1

La chimie à l'honneur, par **P. Rabu** 1

CLIN D'ŒIL ÉTYMOLOGIQUE 3

À propos de l'acroléine, par **P. Avenas** 3

LE GRAIN DE SEL DU RJ-SCF 4

Anvers 2026 : l'Europe des jeunes chimistes et le grain de sel français, par **R. Jeanne-Brou** et **I.-A. Pavel** 4

CHIMIE VERTE INSIGHTS – REGARDS SUR LA CHIMIE VERTE 6

Chimie Verte Academy : l'Université Savoie Mont Blanc, chef de file d'une ambition nationale, par **G. Chatel** 6

À PROPOS DE 8

La SCF en mouvement : rendre visible une communauté qui agit. Séminaire des présidents d'entités, Bordeaux, 21 juin 2026, par **A. Burger** 8

RECHERCHE ET DÉVELOPPEMENT 10

Peut-on vraiment distinguer un lait biologique d'un lait conventionnel ? Quand la chimie et l'intelligence artificielle s'allient contre la fraude alimentaire, par **C. B. Y. Cordella**, **L. Tsamba**, **H. Debétencourt**, **J.-F. Morin**, **E. Jamin**, **R. Vidal**, **S. Jourdren**, **E. Baconnier**, **L. Lakhal**, **D. Bertrand** et **F. Thomas** 10

Les réactions d'oxydation en milieu homogène, des alternatives durables aux catalyseurs à base de palladium, par **N. Abuhafez**, **I. Yadav** et **R. Gramage-Doria, *prix DivCat 2024-2025*** 16

Illuminer et détruire : une approche ciblée pour le traitement des métastases du cancer de l'ovaire, par **M. Moinard, *prix SP2P 2025*** 22

Le supersilane, l'abstracteur d'atomes d'halogène privilégié en photochimie, par **L. Geniller**, **F. Jaroschik** et **A. Prieto, *prix DCO 2025*** 28

La vitamine B1 et les carbènes *N*-hétérocycliques : inspiration ou invention ?, par **L. Delfau**, **E. Tomás-Mendivil** et **D. Martin, *prix DCO 2025*** 34

Les alcynes-SF_5, des briques moléculaires polyvalentes aux multiples applications, par **L. Popek**, **N. Blanchard** et **V. Bizet, *prix DCO 2025*** 41

Principes et substances actifs

Nouveaux principes actifs pharmaceutiques, par **J.-M. Paris** 46

CHIMIE ET SOCIÉTÉ 48

La chimie s'invite sur les routes de France, par **M.-C. Vitorge** 48

EN BREF 51

LIVRES ET MÉDIAS 55

Comptes Rendus Chimie 55

AGENDA 60

ACTUALITÉS DE LA SCF 61

Un POINT SUR 63

Fiche n° 139 : Les cristaux dopés terres rares pour les technologies quantiques, par **P. Goldner**, **D. Serrano** et **A. Tallaire** 63



Couverture :
Une approche multi-techniques incluant les profils RMN ^{1}H pour contrôler l'authenticité biologique du lait.
Spectre RMN tiré de l'article de C. Cordella *et coll.* (figure 4, p. 14) ; bouteilles de lait, crédits photo : Winterling/iStock.

À propos de l'acroléine



Homme polissant du plexiglas dans une installation de Rohm and Haas vers 1940.

Le nom de l'acroléine, attesté en 1835, inspirera ceux des acides acrylique en 1843 et méthacrylique en 1865, puis de l'acrylamide et de l'acrylonitrile en 1893, une « saga acrylique » qui, après une thèse exceptionnelle en 1901, aboutira au XX^{e} siècle au développement des fibres, résines, peintures et revêtements acryliques, ainsi que des verres acryliques, tels que le plexiglas et l'altuglas[1].

L'odeur caractéristique de l'acroléine

Il était connu depuis longtemps que la cuisson prolongée des corps gras finit par dégager une substance volatile ayant une odeur âcre et piquante caractéristique. Une note de 1835 dans les *Notizen aus dem Gebiete der Natur und Heilkunde* (Notes dans les domaines de la nature et de la médecine) rapporte que le chimiste allemand Rudolph Brandes a identifié la substance responsable de cette odeur et l'a nommée en allemand *Acrolein*. Selon l'*Oxford English Dictionary*, *Acrolein* (d'où *acrolein* en anglais, *acroléine* en français) est formé sur le latin *acer*, *acris*, « aigre », et *olere*, « exhaler une odeur », lié à *odor* « odeur ». Cependant, dans une publication en allemand de 1838, Brandes n'emploie pas *Acrolein* mais *Acrol* en écrivant « *J'ai nommé* Acrol *cette huile car elle est d'odeur piquante* », et il considère à tort la substance comme une huile… De plus, dans son *Traité de chimie*, Berzelius écrivait en 1839 à propos de cette substance : « *Brandes a cherché à l'isoler et il l'appelle* acroléine*, de* acris*, âcre, et* oleum*, huile.* » Il existe donc une certaine confusion : l'élément *-ole-* d'*Acrolein* signifie-t-il « odeur » ou « huile » ? Malgré tout le respect que l'on doit à Berzelius, toujours attentif aux mots employés, le sens « odeur » paraît plus convaincant, car tous les auteurs insistent sur l'odeur qui se manifeste.
Ensuite, le chimiste allemand Josef Redtenbacher publie en 1843 un long article sur la distillation des corps gras dans les *Annales de chimie et de pharmacie*. Il confirme le nom *Acrolein* et montre que cette substance provient d'une déshydratation du glycérol :

$$\underset{\text{glycérol}}{HOH_2C–CHOH–CH_2OH} \rightarrow \underset{\text{acroléine}}{H_2C=CH–CHO} + 2\ H_2O$$

De l'acroléine aux acides acrylique et méthacrylique

Redtenbacher montre également que l'acroléine est un aldéhyde, et plus précisément l'aldéhyde d'un acide organique qu'il nomme *Acrylsäure* (d'où *acrylic acid* en anglais, *acide acrylique* en français), et qu'il obtient par oxydation de l'acroléine (d'où l'ancien nom, *acroléique*, de cet acide) :

$$\underset{\text{acroléine}}{H_2C=CH–CHO} + ½\ O_2 \rightarrow \underset{\text{acide acrylique}}{H_2C=CH–COOH}$$

Le nom systématique de cet acide est *propénoïque*, et il s'obtient industriellement aujourd'hui par oxydation du propène, plus souvent nommé *propylène*.

Plus tard, en 1865, les chimistes anglais Frankland et Duppa synthétisent l'acide qu'ils nomment en anglais *methacrylic acid*, abréviation de *methyl-acrylic*, d'où *acide méthacrylique* en français et *Methacrylsäure* en allemand :

$$\underset{\text{acide méthacrylique}}{H_2C=C(CH_3)–COOH}$$



L'acrylique est aussi une peinture appréciée par les artistes peintres, Pexels/Czapp Arpád.

De l'acide acrylique à l'acrylamide et à l'acrylonitrile

Le chimiste français Moureu, qui étudiait les dérivés de l'acide acrylique, publie en 1893 l'obtention de ce qu'il décrit comme « *la plus simple des amides non saturées* », aujourd'hui un amide, qu'il nomme *acrylamide*, de formule CH_2=CH-CO-NH_2. Dans la même publication de 1893, il décrit l'obtention, par déshydratation de l'acrylamide, de ce qu'il nomme *nitrile acrylique*, de formule CH_2=CH-CN. Il utilise ainsi le terme *nitrile*, de l'allemand *Nitril*, d'abord un suffixe comme dans *Benzonitril* (1844) puis nom générique *Nitril* (1848) des produits de formule R-CN.
Le nom *acrylonitrile* est adopté en anglais dès 1893 dans le *Journal of Chemical Society* de Londres, mais en français l'usage de *nitrile acrylique* a perduré et le mot *acrylonitrile* n'est attesté que plus tard à propos des élastomères butadiène-acrylonitrile, de la fibre acrylique (polyacrylonitrile) ou de l'ABS (acrylonitrile-butadiène-styrène).

Épilogue acrylique et méthacrylique

Il est rare qu'une thèse soutenue par un étudiant ait un retentissement comparable à celui des meilleures publications de scientifiques seniors. C'est pourtant le cas de la thèse sur les acrylates et méthacrylates, et leurs polymères et copolymères, soutenue à Tübingen en 1901 par Otto Röhm (1876-1939), après ses études de pharmacie commencées à Munich. En effet, cette thèse remarquable a ouvert la voie au développement industriel des résines acryliques utilisées dans les peintures et revêtements dont l'intérêt essentiel est d'être à base d'eau et non plus de solvant. Après sa thèse, Röhm a créé une société industrielle où il a inventé en 1933 le verre acrylique sous la marque *Plexiglas*®, devenu nom commun, *plexiglas*, dans toutes les langues, et concurrencé en français par *altuglas* depuis 1976 dans le *Petit Robert* et 1988 dans le *Petit Larousse*.

[1] P. Avenas, M.-T. Dinh-Audouin, *La Prodigieuse histoire du nom des éléments*, EDP Sciences/SCF, **2018**, p. 236.

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

*pier.avenas@orange.fr

Anvers 2026 : l'Europe des jeunes chimistes et le grain de sel français



Les deux déléguées françaises, Roselyne Jeanne-Brou (à gauche) et Ileana-Alexandra Pavel (à droite), lors de l'Assemblée des délégués de l'EYCN (Anvers, juillet 2026).

En marge du 10e congrès de la Société Européenne de Chimie (*European Chemical Society*, EuChemS) organisé à Anvers (Belgique) en juillet 2026, les délégués du réseau européen des jeunes chimistes (*European Young Chemists' Network*, EYCN) se sont réunis pour leur 21e Assemblée [1]. Nous, Rose Jeanne-Brou et Ileana-Alexandra Pavel, y représentions la France et profitons de ce Grain de Sel pour présenter les rôles de l'EuChemS et de l'EYCN, livrer notre regard sur ce que l'Europe offre déjà aux jeunes chimistes, et ce qu'il nous reste à y apporter.

Deux étages, une même voix

L'EuChemS fédère les sociétés chimiques nationales en Europe – dont la Société Chimique de France – et représente ainsi à travers elles des dizaines de milliers de chimistes. Son rôle premier est de porter la voix de la communauté des chimistes auprès de la Commission européenne, du Parlement européen et des agences de recherche [2]. Elle publie pour cela des prises de position, portées par sa secrétaire générale (actuellement Nineta Hrastelj) auprès des institutions européennes, sur des grands enjeux scientifiques et sociétaux actuels comme le climat, les matières premières critiques, la chimie durable, l'économie circulaire, le Pacte vert, le financement de la recherche, les carrières ou l'éthique [3].
L'EYCN est la division « jeunes » de l'EuChemS [4]. Tout jeune adhérent d'une société nationale représentée en fait automatiquement partie, et donc tout jeune adhérent de la SCF (moins de 35 ans) en est membre, souvent sans le savoir. Chaque société nationale nomme jusqu'à quatre délégués pour la représenter, répartis dans les équipes thématiques de l'EYCN (communication, relations internationales, adhésions, réseaux, science) [5]. L'EYCN a vocation à être complémentaire à l'EuChemS : cette dernière parle à l'Europe au nom de l'ensemble des chimistes, et l'EYCN s'assure en particulier que les étudiants, doctorants, postdoctorants et jeunes professionnels y sont également entendus et bénéficient de dispositifs propres à leur stade de carrière. C'est en partie grâce à cette représentation que l'Europe fournit déjà plusieurs outils à disposition des membres de l'EYCN.

Ce que l'Europe offre déjà aux jeunes chimistes

Plusieurs dispositifs mis en place par l'EYCN existent à destination des jeunes chimistes européens, mais demeurent souvent méconnus en France. On peut notamment citer : le *European Young Chemist Award*, décerné tous les deux ans lors du *EuChemS Chemistry Congress* ; le programme d'échanges *Young Chemists Crossing Borders* en partenariat avec les jeunes chimistes de l'*American Chemical Society* ; les webinaires *What can I be with a PhD?* consacrés aux carrières après la thèse ; ou encore les bourses pour assister à des congrès nationaux et internationaux. Ces dispositifs peuvent être retrouvés sur la page LinkedIn de l'EYCN ou dans la rubrique *Projects* de leur site web [6,7].
L'EYCN porte aussi une ambition de politique scientifique pour offrir aux jeunes chimistes une plateforme visant à contribuer à l'élaboration des politiques européennes [7]. Lors de l'Assemblée des Délégués EYCN de 2025 à Prague [8], les jeunes représentants des sociétés nationales ont par exemple travaillé sur le 10e programme-cadre de recherche et d'innovation de l'Union européenne et sur une enquête EuChemS consacrée à l'employabilité des chimistes ayant notamment souligné le manque de connaissances sur les opportunités d'emploi en dehors du milieu universitaire [9]. Cette année, à Anvers, trois chantiers nous ont particulièrement frappées : sur l'offre d'orientation, notamment incarnée par l'*EYCN Career Compass*, un ensemble de posts LinkedIn relayant des offres d'emploi européennes, des podcasts et des expéditions d'apprentissage en milieu industriel [6] ; sur l'égalité, en visant à démontrer par l'exemple qu'une gouvernance scientifique paritaire peut devenir la norme et non pas être l'exception [5] ; et sur le transfert de technologie, en l'accélérant par le dialogue entre universités, instituts de recherche, start-up, industriels et organismes publics [3]. Grâce à cette assemblée, nous repartons ainsi avec beaucoup de pistes de réflexion et de solutions à implémenter sur notre réseau national pour pleinement bénéficier de l'EYCN.

Et pour le Réseau Jeune de la SCF, notre « grain de sel »

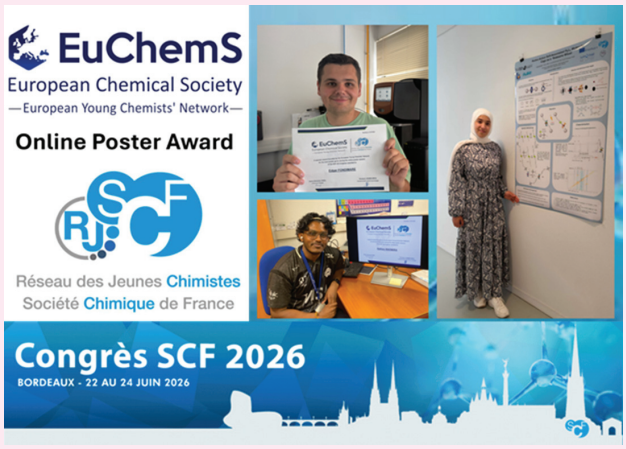
Trois constats majeurs se dégagent de notre assemblée à Anvers, pour lesquels nous suggérons plusieurs propositions pour leur prise en compte à notre échelle nationale.
Tout d'abord, bien qu'une enquête menée par le RJ-SCF auprès de ses membres recommandait déjà en 2016 d'améliorer la visibilité de l'EYCN [10], cette recommandation tient toujours aujourd'hui. Le bureau national du RJ doit continuer à mettre en avant les actions de ce réseau européen et doit davantage inciter ses bureaux régionaux, qui sont au plus proche des adhérents, à relayer au moins une fois par an les publications de l'EYCN sur leurs réseaux sociaux.
Ensuite, il nous paraît important de promouvoir la création d'entreprise comme voie professionnelle à part entière pour les chimistes. Les compétences transversales comme la conduite de projet au long cours, la gestion de l'échec ou la rigueur de la preuve, sont exactement celles qu'exige une

jeune entreprise technologique, comme peut en témoigner une des autrices (R. Jeanne-Brou), et sont développées lors des expériences professionnelles des jeunes scientifiques, notamment pendant un doctorat. L'EYCN associe déjà start-up et dialogue recherche/industrie, et le RJ-SCF doit s'appuyer sur son soutien pour davantage présenter cette voie de carrière accessible à ses adhérents en relayant ses dispositifs (comme le *Career Compass*) tout en adaptant les informations aux éventuelles spécificités du système français pour accroître sa pertinence auprès de sa communauté.
Enfin, la chimie européenne ne manque ni de science, ni d'institutions, mais peine cependant à transformer ses résultats de recherche en capacité industrielle à cause de politiques d'innovation fragmentées, de coûts énergétiques inégaux et d'un accès limité au capital-risque [11]. L'EYCN est un canal à privilégier pour faire entendre cette voix car des sujets comme les matières premières critiques et l'économie circulaire figurent déjà parmi les priorités d'EuChemS, et les jeunes chimistes des laboratoires, de l'industrie et des start-up ont des données de terrain à partager. Le RJ-SCF doit alors se placer comme interlocuteur majeur entre la recherche française menée par les jeunes chimistes de France et son rayonnement à l'échelle européenne et mondiale.

En somme, l'Europe des jeunes chimistes n'est pas une abstraction : elle a des délégués, des équipes, et la plupart de ses actions sont actives toute l'année ; il ne reste qu'à s'en servir et à y mettre votre grain de sel ! Le Réseau Jeune de la Société Chimique de France a un rôle majeur à jouer dans la promotion de ses dispositifs auprès de ses adhérents, n'hésitez donc pas à vous rapprocher de vos bureaux régionaux, du bureau national, et surtout de vos déléguées auprès de l'EYCN, pour plus de détails !

Les liens mentionnés ont été consultés le 25 septembre 2026.
[1] ECC10 – EuChemS 2026 – 10th EuChemS Chemistry Congress, https://euchems2026.eu
[2] D.J. Cole-Hamilton, The European Chemical Society (EuChemS), *Chem. Eur. J.*, **2018**, *24*, p. 11811-20, https://doi.org/10.1002/chem.201803512
[3] R. Jeanne-Brou, EuChemS & EYCN: 10 Key Initiatives Shaping the Future of Chemistry in Europe, www.linkedin.com/pulse/euchems-eycn-10-key-initiatives-shaping-future-europe-jeanne-brou-b22ee
[4] EuChemS, European Young Chemists' Network, www.euchems.eu/divisions/european-young-chemists-network
[5] EuChemS, Governance, www.euchems.eu/divisions/european-young-chemists-network/governance
[6] European Young Chemists' Network (EYCN), www.linkedin.com/company/eycn
[7] EuChemS, EYCN Projects, www.euchems.eu/divisions/european-young-chemists-network/eycn-projects
[8] K. Szafrańska, EuChemS at the EYCN Delegate Assembly 2025, EuChemS, **2025**, www.euchems.eu/euchems-at-the-eycn-delegate-assembly-2025
[9] R. Salzer, N. Hrastelj, A. Smith, Employment Survey for European Chemists (ESEC3). How Diverse is Europe's Chemical Workforce?, *Chem. Eur. J.*, **2024**, *30*, e202401222, https://doi.org/10.1002/chem.202401222
[10] M. Rossato, G. Chatel, Qu'attendent les jeunes chimistes de la SCF ?, *L'Act. Chim.*, **2016**, *405*, p. 6-9.
[11] J. García-Martínez, Chemistry in Transformation: A European Moment, *Angew. Chem. Int. Ed.*, **2026**, *65*, e26116, https://doi.org/10.1002/anie.202526116

L'EYCN récompense les posters du congrès SCF 2026



Les gagnants du prix EYCN qui a récompensé les posters de trois jeunes chimistes au congrès SCF26 : Edgar Fondimare (à gauche, en haut), Rathies Ravindra (à gauche, en bas) et Malika Alshab (à droite).

À l'occasion du congrès SCF 2026, qui s'est tenu du 22 au 24 juin à Bordeaux, l'EYCN a récompensé trois posters présentés en anglais par **Malika Alshab** (MOLTECH-ANJOU, Université d'Angers), **Rathies Ravindra** (Laboratoire de Génie Chimique et Institut de Pharmacologie et de Biologie Structurale, Université de Toulouse) et **Edgar Fondimare** (Institut CARMeN Caen, Université Caen Normandie). Pour élire les meilleurs posters, les jeunes participants au congrès ainsi que l'ensemble des membres de la SCF de moins de 35 ans ont été invités à voter en ligne pour leurs trois posters préférés. Cette remise de prix s'est déroulée dans un contexte particulier : en raison d'un arrêté préfectoral lié à la canicule, la session posters du congrès a dû être réorganisée ; sur proposition du RJ-SCF, les posters ont finalement été présentés en ligne sur LinkedIn, permettant de maintenir les échanges malgré les contraintes liées aux fortes chaleurs.
« *I am very honored to receive the RJ-SCF EYCN poster prize. Presenting my PhD work at SCF26 was a great opportunity, and I sincerely thank the RJ-SCF and EYCN for this recognition* » – Rathies Ravindra.
Et ce n'est pas fini : les différentes divisions de la SCF, dont le RJ-SCF, préparent également une série de webinaires consacrés aux communications orales initialement prévues lors du congrès. Rendez-vous bientôt en ligne !
Vous organisez une conférence qui inclut au moins une session en anglais et qui est portée par de jeunes chimistes ? Vous pouvez solliciter l'un des délégués EYCN français pour vous aider à décerner des prix de la meilleure présentation (poster ou communication orale) avec le soutien de l'EYCN.

Appel à contributions

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

Cet article a été préparé par **Roselyne JEANNE-BROU**, fondatrice et présidente de CashVolt, présidente du RJ-SCF et déléguée française à l'Assemblée des Délégués EYCN 2026 (presidence.rj@societechimiquedefrance.org), et **Ileana-Alexandra PAVEL**, maîtresse de conférences en pharmacie galénique à l'Université Paris-Saclay, Institut Galien Paris-Saclay (IGPS, UMR CNRS 8612), et déléguée française à l'Assemblée des Délégués EYCN 2026 (ileana.pavel@universite-paris-saclay.fr).
Les « Grains de Sel » sont coordonnés par **Lise ESTOURNET**, membre du Bureau national du RJ-SCF, responsable communication (lise.estournet@gmail.com), et **Alexis PERROT**, président du RJ-SCF Normandie (alexis.perrot@ensicaen.fr). Ils sont en téléchargement libre sur www.lactualitechimique.org

Chimie Verte Academy : l'Université Savoie Mont Blanc, chef de file d'une ambition nationale

L'Université Savoie Mont Blanc (USMB) est une université pluridisciplinaire de près de 15 000 étudiants, implantée sur les territoires de la Savoie et de la Haute-Savoie, qui développe notamment des activités de formation et de recherche autour des enjeux de transition environnementale. Elle est aujourd'hui l'établissement chef de file de la *Chimie Verte Academy*, projet lauréat de l'appel « Compétences et Métiers d'Avenir » de France 2030. Réunissant cinq universités (Poitiers, Picardie Jules Verne, Toulouse, Strasbourg et Savoie Mont Blanc) et de nombreux partenaires académiques, industriels et institutionnels, ce projet vise à accompagner l'évolution des formations et des compétences face aux transformations de la chimie et aux enjeux de transition environnementale.
Dans ce nouveau numéro de *Chimie Verte Insights*, Philippe BRIAND, président de l'Université Savoie Mont Blanc, revient sur les raisons de cet engagement, sur le rôle d'une université chef de file d'un tel projet national et sur les perspectives de structuration et de pérennisation d'une dynamique collective autour de la formation en chimie verte.

L'Université Savoie Mont Blanc est chef de file de la Chimie Verte Academy, l'un des projets « Compétences et Métiers d'Avenir » de France 2030. Pourquoi une université doit-elle aujourd'hui s'engager sur les enjeux de formation liés à la chimie verte et à la transition environnementale ?


Philippe Briand, président de l'Université Savoie Mont Blanc, © USMB 2025.

La transition environnementale est l'affaire de toutes et tous. Les universités, qui accueillent et forment les étudiantes et étudiants, citoyennes et citoyens de demain, sont au premier chef concernées et pleinement mobilisées en faveur de cette transition.
Elles se sont dotées de schémas directeurs du développement durable et de la responsabilité sociétale et environnementale et proposent à l'ensemble des étudiantes et étudiants de premier cycle des formations sur ces thématiques.
Dans ce contexte, il est tout naturel que les universités qui disposent d'atouts en matière de formation et de recherche dans le domaine de la chimie s'engagent dans le développement de la chimie verte. C'est le cas de l'Université Savoie Mont Blanc.

Qu'est-ce qui a conduit l'USMB à s'engager dans la Chimie Verte Academy et à en prendre le rôle de chef de file ? Comment cet engagement s'inscrit-il dans les grandes orientations stratégiques de l'université ?

Le développement de l'Université Savoie Mont Blanc repose sur deux piliers fondamentaux : l'excellence académique et la proximité avec son écosystème. Elle ambitionne d'être un acteur engagé de la société et de contribuer à éclairer le débat public sur les grands enjeux sociétaux.
Parmi ses orientations stratégiques figure le développement de formations et de recherches à fort impact, notamment dans les domaines des transitions environnementale et numérique, ainsi que des transformations de la société. Elle peut notamment s'appuyer sur l'expérience acquise depuis plusieurs années à travers son master « Chimie Verte et Éco-Innovations », développé en lien étroit avec les acteurs industriels.
Assumer le rôle de chef de file de la Chimie Verte Academy s'inscrit donc pleinement dans la stratégie de l'Université. Cette responsabilité lui permet de concrétiser son ambition de jouer un rôle moteur dans les transitions et de mettre son excellence académique au service des grands défis sociétaux.

La Chimie Verte Academy repose sur une coopération entre universités, acteurs industriels et acteurs institutionnels. En quoi cette organisation collective est-elle importante pour faire évoluer les formations en chimie au rythme des transformations du secteur ?

L'Université Savoie Mont Blanc entretient des relations étroites avec les collectivités territoriales et les entreprises implantées en Savoie et en Haute-Savoie. Cette proximité avec son écosystème constitue l'un des fondements de sa réussite académique. Elle permet d'aborder une même question sous des angles complémentaires et de prendre en compte les attentes et les besoins des différents acteurs.
La Chimie Verte Academy permet aujourd'hui de prolonger cette dynamique à l'échelle nationale, en fédérant des universités et des partenaires issus de différents territoires autour d'ambitions communes.
La transformation des formations en chimie s'inscrit pleinement dans cette approche plurielle. C'est en croisant les objectifs et les besoins des universités, des acteurs industriels et des institutions que pourra s'engager une transformation ambitieuse et durable. En effet, aucun de ces acteurs ne dispose, à lui seul, d'une compréhension suffisamment complète des enjeux et des évolutions à prendre en compte.

Être chef de file d'un projet national comme la Chimie Verte Academy représente aussi un engagement dans la durée. Comment l'USMB entend-elle inscrire cette dynamique au-delà des actions financées par France 2030 et conforter son positionnement dans le domaine de la chimie verte ?

L'Université Savoie Mont Blanc, en tant que chef de file du projet Chimie Verte Academy, a vocation à jouer un rôle moteur dans la structuration de cette thématique. Dans un premier temps, elle a travaillé avec le ministère de



Vue aérienne du campus du Bourget-du-Lac de l'Université Savoie Mont Blanc, © USMB 2018.

l'Enseignement supérieur, de la Recherche et de l'Espace à la création d'une mention de master « Chimie verte ». Elle portera cette nouvelle mention dès la rentrée universitaire 2027, avant que d'autres universités puissent à leur tour s'en saisir.
Les financements du plan France 2030, et plus largement ceux des programmes d'investissements d'avenir, doivent être considérés comme des tremplins et des leviers permettant de développer ou de transformer une activité, tout en préparant les conditions de sa pérennité et de sa soutenabilité.
Dans cette perspective, l'un des axes majeurs de pérennisation de la Chimie Verte Academy réside dans le développement de la formation continue dans le domaine de la chimie verte. Cette ambition suppose, en cohérence avec l'approche partenariale évoquée précédemment, de mobiliser l'ensemble de la filière afin de construire une offre de formation adaptée aux besoins et aux évolutions du secteur.

À l'horizon 2030, quelle place souhaiteriez-vous voir la Chimie Verte Academy occuper dans le paysage national de la formation en chimie verte, et quel rôle l'USMB, en tant que chef de file, peut-elle jouer dans cette ambition collective ?

À l'horizon 2030, l'Université Savoie Mont Blanc ambitionne de fédérer, à l'échelle nationale, l'ensemble des acteurs de la filière de la chimie verte : les universités et, plus largement, les acteurs de l'enseignement supérieur et de la recherche, mais aussi les acteurs économiques et industriels. L'objectif est de faire de la Chimie Verte Academy une référence nationale dans le domaine de la chimie verte. Il s'agit là de sa priorité première.
En tant que chef de file de la Chimie Verte Academy, l'Université Savoie Mont Blanc a la responsabilité de contribuer à l'identification, à la fédération et à la structuration de l'ensemble de ces acteurs. Une fois cette dynamique collective

« L'objectif est de faire de la Chimie Verte Academy une référence nationale dans le domaine de la chimie verte »

engagée et l'écosystème structuré, se posera la question de son animation dans la durée.
L'Université Savoie Mont Blanc sera prête à assumer cette responsabilité si cela s'avère nécessaire et pertinent. Toutefois, l'enjeu essentiel n'est pas de déterminer qui assurera l'animation de cet écosystème, mais bien de parvenir à le structurer durablement à l'échelle nationale.



Présidence de l'USMB, © USMB.

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

Société Chimique de France

La SCF en mouvement : rendre visible une communauté qui agit

Séminaire des présidents d'entités, Bordeaux, 21 juin 2026

Alain BURGER

Membre du conseil d'administration de la SCF.
✉ Alain.BURGER@univ-cotedazur.fr

Comment mieux faire connaître la Société Chimique de France, montrer ses actions et inciter à la rejoindre, et surtout permettre à chacun d'y trouver sa place ? C'est autour de cette question, au cœur des enjeux d'attractivité, de visibilité et de lisibilité, que les représentants des entités de la SCF se sont retrouvés à Bordeaux le 21 juin dernier. Une journée de travail et d'échanges qui a également permis de faire le point sur les évolutions engagées dans le fonctionnement de la Société et de préparer les prochaines échéances.

Une trentaine de représentants des sections régionales, divisions, groupes thématiques et réseaux de jeunes chimistes (RJ) de la Société Chimique de France (SCF) étaient réunis à Bordeaux pour une journée consacrée à la SCF, à son fonctionnement et à son avenir. Plus de dix heures d'échanges au cours desquelles une conviction s'est progressivement dégagée : la SCF dispose d'une richesse importante, mais doit encore mieux la faire connaître et mieux la partager. Car derrière ses différentes composantes, ses événements, ses prix, ses publications, ses actions en région ou auprès des jeunes, ce sont avant tout des femmes et des hommes qui font vivre la Société. Le séminaire a donc été l'occasion de regarder à la fois ce qui fonctionne, ce qui peut être amélioré et ce qui doit être construit pour les prochaines années.

Préparer une SCF qui fonctionne mieux

Une première partie de la journée a été consacrée au fonctionnement interne de la Société. Un chantier important est engagé depuis 2025 autour des statuts, du règlement intérieur et de l'organisation des entités. L'objectif est de clarifier et de fluidifier le fonctionnement de la SCF, tout en tenant compte des attentes exprimées par ses différentes composantes. Le mode d'élection et la composition du conseil d'administration, le rôle des sections régionales et du RJ-SCF, le positionnement des divisions et l'articulation avec les groupes thématiques font notamment partie des sujets examinés. Une nouvelle mouture des statuts a été validée par le conseil d'administration le 18 juin 2026. Elle doit désormais être soumise à une assemblée générale extraordinaire, puis suivre la procédure d'instruction auprès du ministère de l'Intérieur avant son adoption définitive. L'objectif est de permettre l'entrée en vigueur des nouveaux statuts avant les élections de renouvellement du conseil d'administration en 2027. Cette évolution constitue une étape importante : elle doit permettre de mieux adapter l'organisation de la SCF à ses missions et à la diversité de sa communauté. Mais le séminaire a aussi montré qu'une organisation ne vit réellement que par les personnes qui s'en emparent.
C'est précisément ce qui a conduit aux échanges de l'après-midi.

Pourquoi adhérer à la SCF ?

La question peut sembler élémentaire. Elle est pourtant essentielle. Que vient chercher à la SCF un étudiant ? Un doctorant ? Un chercheur ? Un enseignant ? Un technicien ? Un industriel ? Un chimiste en début de carrière ou, au contraire, au terme de celle-ci ? Les échanges ont montré que les réponses existent déjà : rejoindre un réseau scientifique et professionnel, participer à des événements, accéder à des prix, des bourses ou des soutiens, bénéficier d'une visibilité pour ses travaux, trouver des offres de stages, de thèses ou d'emploi, accéder à des ressources et à des contenus, ou tout simplement appartenir à une communauté nationale vivante de chimistes. Mais ces possibilités sont encore trop souvent dispersées ou insuffisamment visibles. L'enjeu n'est donc pas seulement de proposer davantage. Il est aussi de mieux montrer ce qui existe déjà. C'est un des messages forts du séminaire. La SCF mène de nombreuses actions, ses entités sont actives et ses ressources sont nombreuses, mais elles ne sont pas toujours identifiées comme faisant partie d'un même ensemble. Le défi consiste désormais à rendre cette richesse plus lisible et plus facilement accessible.

Une communauté riche mais parfois difficile à voir

Prix et médailles, bourses, soutiens aux congrès, événements, offres de stages et d'emploi, *L'Actualité Chimique*, initiatives du RJ-SCF, actions des sections régionales, divisions et groupes : les exemples ne manquent pas. Encore faut-il que ces initiatives soient visibles. Plusieurs pistes ont ainsi été proposées : une meilleure présentation des avantages de l'adhésion, des supports de communication communs, des contenus courts pour les réseaux sociaux, des témoignages d'adhérents, une meilleure valorisation des prix et des actions des entités ou encore un accès plus direct aux offres et aux ressources disponibles. L'idée de mettre à disposition des entités des kits de communication prêts à l'emploi est particulièrement révélatrice de cette volonté. Présentations, flyers, affiches, visuels pour les réseaux sociaux, vidéos ou kakémonos permettraient à chaque section, division, groupe ou RJ de parler de la SCF avec des outils communs, sans avoir à tout reconstruire localement. De même, l'idée d'un point d'entrée unique rassemblant les événements, prix, bourses, soutiens, offres, vidéos, actions des entités, chiffres clés et ressources pourrait permettre de mieux donner à voir l'activité réelle de la Société. L'objectif est finalement assez simple : lorsqu'un chimiste entend parler de la SCF, il doit pouvoir comprendre rapidement qui elle est, ce qu'elle fait et ce qu'il peut y faire.

De la visibilité à l'engagement

Mais rendre la SCF plus visible n'est qu'une première étape. Encore faut-il donner envie de participer – et permettre de le faire facilement. Le séminaire a ainsi mis en avant l'importance

de l'accueil des nouveaux adhérents. Un message personnalisé, un kit d'accueil, quelques repères sur les premiers pas dans la Société et une orientation vers les entités correspondant aux centres d'intérêt de chacun pourraient faciliter cette première rencontre avec la communauté SCF. La fidélisation constitue l'autre versant de cette réflexion. Pourquoi certains adhérents ne renouvellent-ils pas leur adhésion ? Que leur a-t-il manqué ? Comment mieux comprendre ces départs et, parfois, donner envie de revenir ? Des relances personnalisées, l'implication des sections régionales et un questionnaire auprès des anciens adhérents font partie des pistes évoquées. Cette attention portée au parcours du membre rejoint une idée plus générale : l'adhésion ne doit pas être un acte ponctuel, mais le début d'une expérience au sein d'une communauté.

Faire davantage de place aux jeunes et à l'industrie, renforcer son positionnement

Cette expérience doit pouvoir commencer tôt. Les relais dans les formations, les écoles doctorales, les laboratoires, les congrès et les réseaux sociaux sont essentiels. Les écoles doctorales notamment sont des relais importants pour faire connaître la SCF, soutenir les jeunes chercheurs et mieux reconnaître leur engagement au sein du RJ-SCF. Un événement national pour les jeunes chimistes, de nouveaux formats de posters ou de présentation en ligne, des dispositifs facilitant la participation aux manifestations scientifiques ainsi qu'un investissement à communiquer en amont plus fort, notamment auprès des lycéens, figurent parmi les pistes évoquées.



L'industrie constitue un autre axe de développement. Sa présence dans la dynamique SCF apparaît encore trop limitée, alors même que les questions de métiers, de carrières, de stages, d'emploi et de transfert entre recherche et monde industriel sont au cœur des préoccupations de nombreux chimistes. Renforcer les liens avec les entreprises, mieux valoriser les métiers et les startups, développer les partenariats et donner davantage de place aux industriels dans certaines instances sont autant de pistes qui pourront contribuer à élargir la communauté SCF.

Enfin, la SCF entend consolider son positionnement comme interlocuteur fédérateur et point de convergence de la communauté chimique. Cette ambition passe notamment par le renforcement des partenariats avec France Chimie et d'autres sociétés savantes et associations. Plusieurs rapprochements sont ainsi à l'étude, parmi lesquels une coopération renforcée entre l'Union des professeurs de physique et de chimie (UdPPC), la SCF et la Société Française de Physique (SFP), ainsi que des liens avec la Société de Chimie Thérapeutique (SCT), les acteurs des glycosciences, de la spectrométrie de masse ou encore la Société des Experts Chimistes de France (SECF). Des conventions de partenariat sont en cours d'élaboration afin de structurer ces collaborations et de favoriser les synergies. L'objectif est de renforcer la visibilité de la chimie, de mieux articuler les initiatives existantes et de donner davantage de portée aux actions collectives au service de la discipline et de ses communautés.

Une ambition qui dépasse la seule SCF

Enfin, les discussions ont rappelé que l'attractivité de la SCF est aussi liée à celle de la chimie elle-même. Comment donner une image plus juste et plus attractive de la chimie auprès des jeunes, des enseignants, des médias et du grand public ? Comment mieux faire connaître ses métiers et ses contributions ? Comment renforcer les liens entre le secondaire, l'enseignement supérieur, le doctorat et l'industrie ? Le séminaire a fait émerger l'idée d'un continuum à construire, dans lequel la SCF pourrait jouer un rôle de lien et de mise en réseau. Les enseignants, les écoles doctorales, les laboratoires, les entreprises, mais aussi les congrès et les réseaux sociaux apparaissent comme autant de relais à investir davantage.

Dans cette perspective, *L'Actualité Chimique* constitue également un atout à mieux valoriser : collections thématiques à partir des articles existants, meilleure visibilité auprès des lycées, contenus scientifiques et métiers sont autant de possibilités pour faire de la revue un vecteur encore plus visible de la SCF.

Transformer les idées en actions

Le séminaire de Bordeaux n'avait pas pour ambition de tout résoudre en une journée. Il a surtout permis de mettre les sujets sur la table, de croiser les expériences et de faire émerger des priorités. La prochaine étape est désormais celle de l'action. Nos actions doivent permettre de mieux communiquer, mieux accueillir, mieux valoriser, simplifier, créer des liens, donner davantage de place aux jeunes et aux industriels, faire connaître ce qui existe et permettre à chacun de comprendre comment il peut contribuer à la vie de la Société. Cette dynamique s'inscrit dans une période particulière puisque 2027 sera l'année du renouvellement du conseil d'administration. Les nouveaux statuts en cours d'adoption doivent accompagner cette nouvelle étape. Le séminaire de Bordeaux a montré que les sujets ne manquent pas et que les idées sont nombreuses. Il a surtout montré qu'une Société Chimique de France dynamique ne peut exister que grâce à l'engagement de sa communauté. La SCF entre ainsi dans une année de transition, mais aussi d'opportunités. Le Bureau espère que le fruit de cette rencontre permettra aux futurs candidats de se présenter avec des projets et des feuilles de route construits collectivement et rendus visibles en amont des élections.

Peut-on vraiment distinguer un lait biologique d'un lait conventionnel ?

Quand la chimie et l'intelligence artificielle s'allient contre la fraude alimentaire

Christophe B.Y. CORDELLA[a,b]*, Lucie TSAMBA[c], Hélène DEBÉTENCOURT[c], Jean-François MORIN[c], Éric JAMIN[c], Rodolphe VIDAL[d], Solenne JOURDREN[d], Emmanuelle BACONNIER[d], Lyes LAKHAL[e], Dominique BERTRAND[f] et Freddy THOMAS[c]*

[a] LARTIC – Laboratoire de Recherche et de Traitement de l'Information Chimiosensorielle, Département Sciences des Aliments, Université Laval, 2425 rue de l'Agriculture, Québec (Québec) G1V 0A6 Canada, www.lartic.fsaa.ulaval.ca
[b] Institut de la Nutrition et des Aliments Fonctionnels (INAF), 2440 boulevard Hochelaga, Université Laval, Québec (Québec) G1V 0A6 Canada.
[c] Eurofins Analytics France, 9 rue Pierre Adolphe Bobierre, BP 42301, F-44323, Nantes Cedex 3, France.
[d] Institut de l'Agriculture et de l'Alimentation Biologiques (ITAB), 149 rue de Bercy, 75595 Paris Cedex 12.
[e] ULR7519 Transformations et Agroressources, 19 rue Pierre Waguet, 60000 Beauvais, France.
[f] DataFrame, Independent researcher, Nantes, France.
✉ christophe.cordella@fsaa.ulaval.ca ; Freddy.Thomas@ftfr.eurofins.com
www.eurofins.com/fr-fr/analyses-agro-alimentaires/solutions-par-analyses/authenticite/authenticite-des-produits-biologiques

Résumé La distinction entre lait biologique et lait conventionnel constitue un enjeu croissant pour la transparence des filières alimentaires et la lutte contre la fraude. Cette question est particulièrement difficile dans le cas du lait UHT, dont la composition finale dépend de nombreux facteurs, allant de l'alimentation des animaux aux procédés industriels appliqués après la collecte. Cet article présente une approche intégrée associant spectrométrie de masse des rapports isotopiques, résonance magnétique nucléaire du proton et méthodes chimiométriques avancées afin d'explorer la possibilité d'authentifier le mode de production du lait UHT. Les isotopes stables du carbone, de l'azote, de l'oxygène et de l'hydrogène apportent une information sur l'alimentation, l'origine géographique et les conditions hydrologiques, tandis que les profils RMN ^{1}H renseignent sur la composition lipidique, les métabolites issus du fonctionnement ruminal des vaches laitières, les composés azotés et les effets du traitement thermique. Les résultats montrent qu'aucun marqueur unique ne permet de caractériser intrinsèquement le label biologique. En revanche, la combinaison de signaux isotopiques et métaboliques, exploitée par des modèles de classification supervisée, permet d'atteindre des performances élevées de discrimination entre laits biologiques et conventionnels. L'approche multi-techniques combinée à la coopération des modèles statistiques améliore la robustesse de la classification par rapport aux techniques prises isolément. Au-delà de la performance prédictive, ces résultats illustrent l'intérêt d'une lecture intégrée du lait comme traceur chimique du système de production et ouvrent la voie à des outils analytiques objectifs pour le contrôle de l'authenticité alimentaire.

Mots-clés **Lait UHT, authenticité biologique, SMRI, RMN ^{1}H, isotopes stables, empreinte métabolique, chimiométrie, analyse en composantes principales, machine à vecteurs de support, fusion de données.**

Abstract **Can organic milk really be distinguished from conventional milk? Combining chemistry and artificial intelligence to fight against food fraud**

Distinguishing organic from conventional milk is becoming an increasingly important issue for transparency in food supply chains and the fight against food fraud. This challenge is particularly complex for UHT milk, whose final composition results from a combination of factors related to the production environment, animal feeding, ruminal metabolism, farming practices, industrial blending, and the thermal treatments applied after milk collection. This article presents an integrated approach combining isotope ratio mass spectrometry, proton nuclear magnetic resonance spectroscopy, and advanced chemometric methods to investigate the potential for authenticating the production system of UHT milk. Stable isotopes of carbon, nitrogen, oxygen, and hydrogen provide information related to animal feeding, geographical origin, and hydrological conditions, whereas ^{1}H-NMR profiles provide insight into lipid composition, metabolites associated with ruminal metabolism in dairy cows, nitrogen-containing compounds, and the effects of heat treatment. The results show that no single marker can intrinsically characterize the organic label. However, combining isotopic and metabolic signatures through supervised classification models enables high discrimination performance between organic and conventional milk. The multi-technique approach, together with the cooperative use of statistical models, improves classification robustness compared with individual analytical techniques used separately. Beyond predictive performance, these findings highlight the value of interpreting milk as an integrated chemical fingerprint of the production system and pave the way for objective analytical tools for food authenticity control.

Keywords **UHT milk, biological authenticity, IRMS, ^{1}H-NMR, stable isotopes, metabolic fingerprinting, chemometrics, principal composent analysis, support vector machine, data fusion.**

https://doi.org/10.63133/scf.act-chim.2026.520.03

Depuis une vingtaine d'années, les produits issus de l'agriculture biologique occupent une place croissante dans les habitudes alimentaires des consommateurs [1,2]. Le lait et les produits laitiers, très présents dans l'alimentation quotidienne[(a)], n'échappent pas à cette tendance. Derrière cette évolution se trouvent des attentes fortes en matière de santé, d'environnement et de bien-être animal. Comme dans d'autres secteurs alimentaires, la confiance des consommateurs peut être fragilisée par des pratiques frauduleuses ou des ambiguïtés dans les modes de production.

Dans ce contexte, la question de l'authenticité des produits biologiques dépasse largement le cadre réglementaire. Elle devient un véritable enjeu sociétal : peut-on établir à partir de mesures analytiques, qu'un produit est effectivement issu d'un mode de production biologique ? Cette problématique est particulièrement complexe pour le lait UHT, dont la composition finale résulte d'une combinaison de facteurs liés à l'environnement de production, à l'alimentation des animaux, au métabolisme ruminal, aux pratiques d'élevage, aux mélanges industriels et aux traitements thermiques appliqués après la collecte [3].

Les travaux présentés ici proposent une réponse originale à cette question en combinant deux approches analytiques complémentaires – la spectrométrie de masse des rapports isotopiques (SMRI, ou IRMS en anglais pour « *isotopic ratio mass spectrometry* ») et la résonance magnétique nucléaire du proton (RMN ^{1}H) – avec des méthodes avancées de traitement des données issues de la chimiométrie et de l'intelligence artificielle. L'objectif est de montrer qu'il est possible d'identifier une signature chimique globale du mode de production, ouvrant la voie à de nouveaux outils de contrôle de l'authenticité alimentaire.

Le lait comme reflet d'un système agricole

Le lait est une matrice biologique, dont la composition chimique reflète une chaîne de causalité allant du sol à l'animal, puis de l'animal au produit final. Cette idée, bien connue en sciences alimentaires, prend ici une dimension particulière. En effet, les pratiques agricoles – qu'elles soient conventionnelles ou biologiques – influencent directement l'alimentation des vaches, qui à son tour modifie leur métabolisme, et donc la composition du lait.

Cette relation indirecte rend l'authentification du lait biologique particulièrement délicate. Contrairement à d'autres produits, il n'existe pas de marqueur unique permettant de distinguer clairement les deux types de production. Les différences observées sont souvent subtiles, variables et dépendantes du contexte géographique ou saisonnier. Comme le soulignent plusieurs travaux antérieurs, les approches fondées uniquement sur la détection de résidus chimiques ou de pesticides de synthèse se révèlent insuffisantes, car elles ne représentent pas directement les pratiques agricoles [4,5].

Dans ce cadre, une stratégie alternative consiste à considérer le lait non pas comme un simple produit, mais comme un traceur chimique du système de production (*figure 1*). Cette approche repose sur l'idée que certaines caractéristiques analytiques – notamment isotopiques et métaboliques – conservent la mémoire des conditions de production.

Les isotopes stables, une signature de l'environnement et de l'alimentation

La spectrométrie de masse des rapports isotopiques constitue un outil particulièrement adapté pour explorer cette mémoire chimique. Elle repose sur la mesure des rapports isotopiques d'éléments légers tels que le carbone, l'azote, l'oxygène ou l'hydrogène. Ces rapports, exprimés sous forme de valeurs δ, dépendent de processus naturels et biologiques bien identifiés.

Par exemple, le rapport isotopique du carbone est donné par la relation entre le rapport isotopique mesuré dans un échantillon rapporté à celui mesuré dans un échantillon de référence international, généralement le VPDB (Vienna Peedee belemnite) :

$$\delta^{13}C = \left(\frac{R_{échantillon}}{R_{référence}} - 1\right) \times 1000 \quad \text{exprimé en ‰}$$

avec $R = \frac{^{13}C}{^{12}C}$ (^{13}C et ^{12}C sont les isotopes naturels stables du carbone, l'isotope ^{14}C étant radioactif).

δ^{13}C est fortement influencé par le type de plantes consommées par les animaux (*figure 2*). Les plantes dites en C3, majoritaires dans les systèmes biologiques européens, présentent des signatures isotopiques différentes de celles des plantes en C4, comme le maïs, plus fréquemment utilisées dans l'alimentation conventionnelle [6,7]. De même, le rapport δ^{15}N est lié aux pratiques de fertilisation, bien que son interprétation soit plus complexe dans le cas des produits animaux en raison des phénomènes de fractionnement isotopique [8].

Les résultats obtenus dans notre récente étude [9] résumée par la *figure 3* montrent que ces isotopes permettent effectivement de différencier partiellement les laits biologiques et conventionnels. Toutefois, cette discrimination reste imparfaite. En particulier, le δ^{15}N présente ici des zones de recouvrement importantes entre les deux classes. Cette observation s'explique notamment par la diversité des pratiques agricoles et, aussi, par les effets de mélange liés à la collecte industrielle du lait.

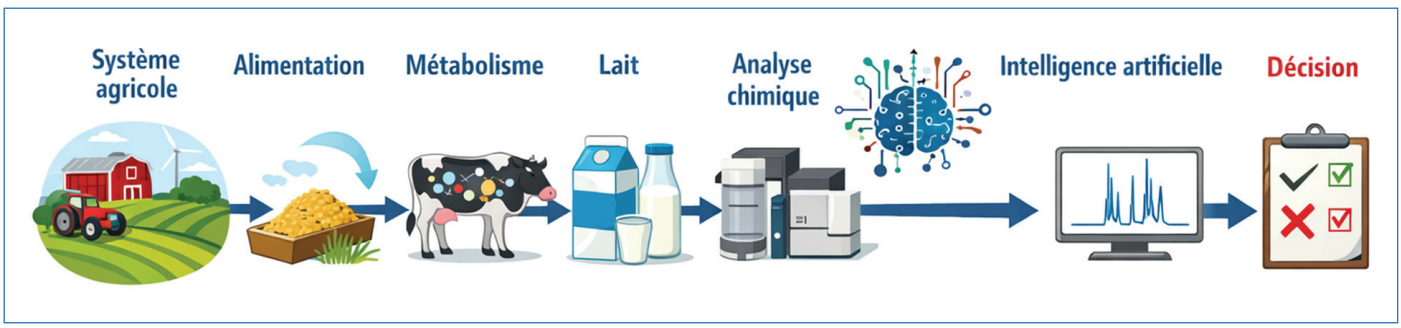


Figure 1 - Des pratiques agricoles à l'authentification du lait biologique.

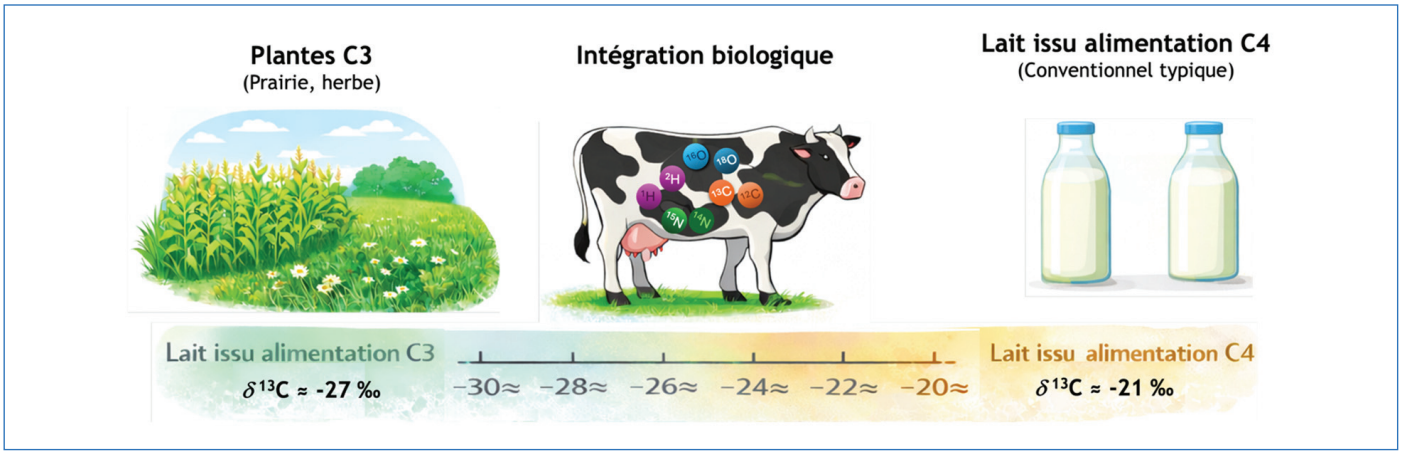


Figure 2 - Recouvrement isotopique possible selon pratique agricole et mélange industriel.

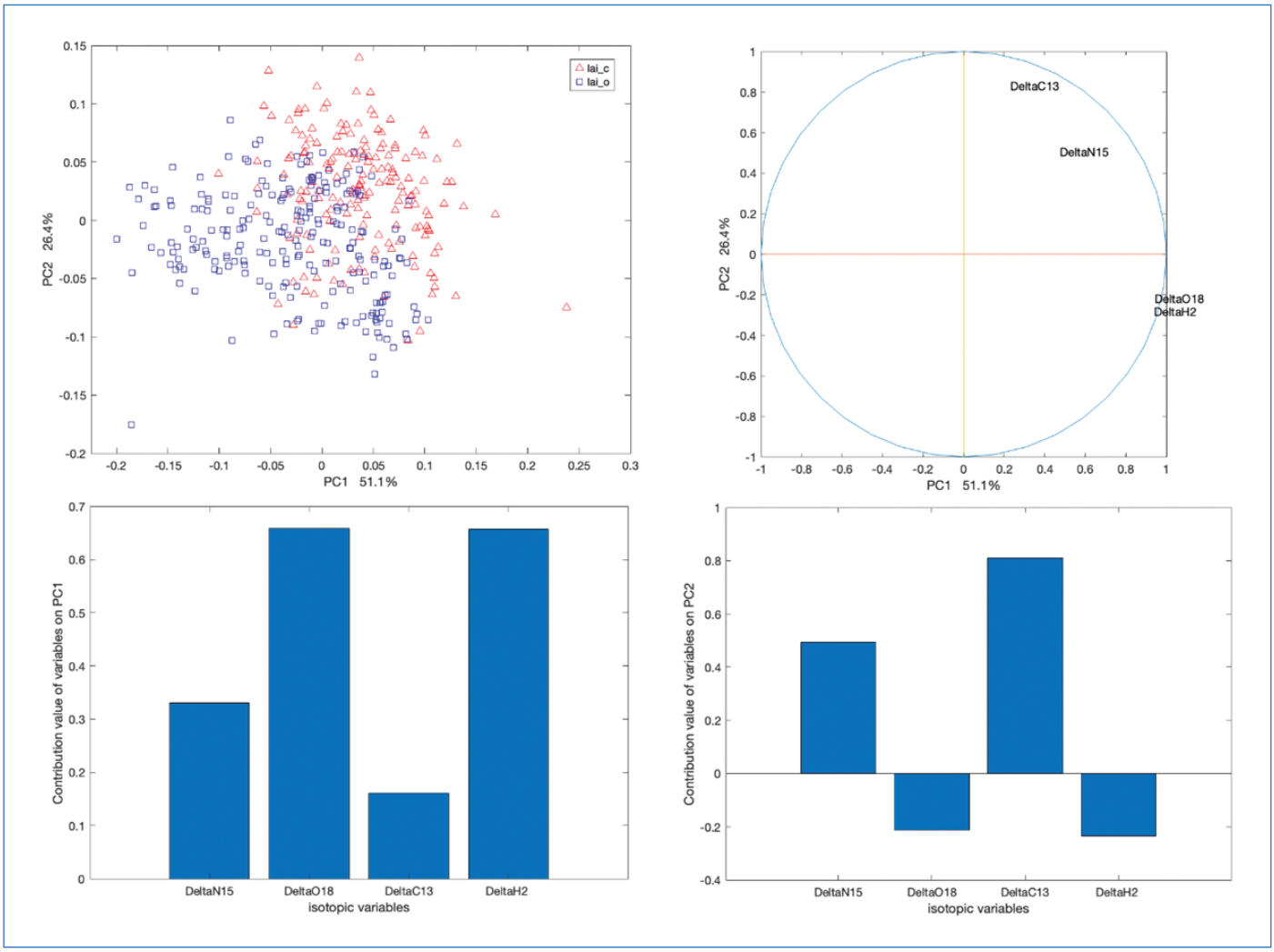


Figure 3 - Analyse des composantes principales des données d'entraînement SMRI. Tiré de Cordella *et al.*, 2026 [9].

En effet, le premier axe (PC1, 51,1 % de variance expliquée) constitue la dimension principale de discrimination et est fortement porté par $\delta^{18}O$ et $\delta^{2}H$, avec une contribution secondaire de $\delta^{15}N$, tandis que $\delta^{13}C$ y contribue plus faiblement. Cette composante traduit principalement des variations liées à l'origine géographique et aux conditions hydrologiques, qui influencent directement les isotopes de l'eau.

Le second axe (PC2, 26,4 %) est, quant à lui, dominé par $\delta^{13}C$, avec une contribution positive marquée, opposée en partie à $\delta^{18}O$ et $\delta^{2}H$. Cette dimension semble refléter davantage des différences liées à l'alimentation des animaux (type de plantes C3/C4) ou aux pratiques agricoles.

Ainsi, si les isotopes stables apportent une information précieuse, ils ne suffisent cependant pas, à eux seuls, à garantir une distinction, puis, par la suite, une classification relative au caractère bio du lait. L'adoption d'une démarche multi-techniques est donc nécessaire pour optimiser la pertinence des données analytiques collectées et la fiabilité des modèles de classification.

La RMN, une empreinte métabolique globale

Complémentaire de l'approche isotopique, la résonance magnétique nucléaire du proton (RMN ^{1}H) permet d'accéder à une description globale du profil métabolique du lait. L'intérêt de cette approche pour étudier l'influence des conditions de production sur les profils métaboliques a notamment été présenté dans une synthèse consacrée à la tomate [10]. Contrairement aux méthodes ciblées, qui se concentrent sur quelques composés, la RMN fournit une vision d'ensemble de la composition chimique en enregistrant spécifiquement la résonance des protons (fréquence de Larmor) de l'échantillon, fréquence qui dépend directement du champ magnétique appliqué, conformément à la relation :

$$\nu = \frac{\gamma}{2\pi} B_0$$

Où ν est la fréquence de résonance (Hz) ; γ est le rapport gyromagnétique du proton, une constante physique qui relie le moment magnétique du proton et son moment angulaire (spin) ; et B_0 est le champ magnétique appliqué (en teslas).

La fréquence de Larmor du proton $\left(\frac{\gamma}{2\pi}\right)$ est égale à 42,58 MHz pour un champ B_0 = 1 *T*, à 400 MHz pour B_0 = 9,4 *T*, 500 MHz pour B_0 = 11,7 *T*, 600 MHz pour B_0 = 14,1 *T* etc.

Les petites variations autour de cette fréquence (en ppm) rendent compte de l'environnement chimique. À noter que la RMN ne mesure pas la fréquence absolue, mais le déplacement chimique (δ) en ppm, relatif à une référence (dans notre étude, le triméthylsilane, TMS) :

$$\delta = \frac{\nu - \nu_{ref}}{\nu_{ref}} \times 10^6$$

Les spectres RMN ^{1}H des laits UHT que nous avons collectés révèlent des différences structurales et métaboliques qui peuvent être directement reliées aux pratiques d'élevage, aux régimes alimentaires des animaux et aux effets du traitement thermique. Ces variations s'expriment dans plusieurs régions spectrales clés, reflétant à la fois la composition lipidique, le métabolisme ruminal et la chimie de transformation du lait.

Dans la région aliphatique (0,8–3 ppm), les signaux associés aux chaînes d'acides gras (groupes méthyles terminaux ~ 0,9 ppm, enveloppe méthylénique ~ 1,2–1,3 ppm, et α-CH_2–CO ~ 2,3 ppm) traduisent la structure et le degré de saturation des lipides. Il est bien établi que les systèmes d'alimentation fondés sur le pâturage favorisent une augmentation des résidus d'acides gras polyinsaturés (PUFA), en particulier les résidus acides gras oméga-3 tels que l'acide α-linolénique, ce qui se traduit en RMN par un renforcement des signaux bis-allyliques (~2,8 ppm) et oléfiniques (~5,3 ppm) [11,12]. Cependant l'observation d'intensités plus élevées dans les laits conventionnels suggère que la signature RMN ne reflète pas uniquement la composition lipidique intrinsèque, mais également des effets combinés liés à l'alimentation (notamment l'utilisation d'ensilage de maïs et de concentrés visant à augmenter l'apport énergétique pour soutenir la production laitière), ainsi qu'au traitement UHT, susceptible d'induire des phénomènes d'oxydation lipidique et de modification structurale [13].

Dans la région des sucres (3–5,5 ppm), dominée par le lactose, les différences observées entre les échantillons ne peuvent être interprétées uniquement en termes de concentration. Elles reflètent également des variations dans les équilibres structuraux du lactose (formes α/β), ainsi que des interactions avec la matrice protéique et minérale. Ces interactions peuvent être modifiées par le traitement thermique UHT, qui favorise la glycation non enzymatique précoce des protéines laitières par le lactose, étape initiale de la réaction de Maillard, susceptible d'influencer indirectement les propriétés spectrales observées [14].

La région comprise entre 1 et 3 ppm met en évidence des composés issus du métabolisme microbien ruminal, tels que les esters dérivés d'acides organiques (lactate, citrate, acétate, formiate). La composition de ces métabolites dépend fortement du microbiote ruminal, lui-même influencé par le régime alimentaire (herbe, ensilage, concentrés). Ainsi, les différences observées dans cette région traduisent une signature indirecte du fonctionnement biologique du rumen et des pratiques d'élevage [15].

Dans la région aromatique (6–9 ppm), les signaux correspondent à des composés à faible concentration issus de métabolites secondaires, tels que les dérivés phénoliques d'origine végétale ou certains dérivés oxydés. Ces composés sont directement liés à l'alimentation des animaux, en particulier à la consommation de végétaux riches en métabolites phénoliques. Leur présence et leur intensité peuvent également être influencées par l'utilisation d'ensilage ou par des processus de transformation thermique, ce qui en fait des marqueurs sensibles mais complexes à interpréter [16,17].

Enfin, les composés azotés (urée, acides aminés libres) observés entre 3 et 6,5 ppm fournissent des informations sur le métabolisme protéique et l'efficacité d'utilisation de l'azote. Ces paramètres sont fortement dépendants du régime alimentaire et du fonctionnement du métabolisme ruminal. Des variations dans les concentrations d'acides aminés tels que la glycine, la L-alanine ou la L-leucine peuvent ainsi refléter des différences dans la digestion et l'assimilation des protéines [8]. Ainsi, ces composés azotés sont des indicateurs de fonctionnement métabolique et de conduite alimentaire, mais pas des biomarqueurs intrinsèques du label bio. Ils deviennent pertinents uniquement dans une approche multivariée combinée (ex. avec δ^{13}C, signaux RMN des lipides du lait, etc.).

Dans l'ensemble, ces résultats montrent que la RMN ^{1}H capture une signature intégrée résultant de l'interaction entre alimentation, métabolisme animal et transformation technologique. Les différences observées entre laits biologiques et conventionnels ne peuvent être attribuées à un seul facteur, mais résultent d'un équilibre complexe entre la composition lipidique, l'activité microbienne et les effets du procédé UHT. Cette approche globale confère à la RMN un fort potentiel pour la caractérisation et la discrimination des systèmes de production laitière (*figure 4*).

La chimiométrie et l'intelligence artificielle révèlent l'information cachée

Face à la complexité des données générées par ces techniques analytiques, l'utilisation de méthodes de chimiométrie et d'intelligence artificielle devient indispensable. L'analyse en composantes principales permet d'explorer la structure des données et de visualiser les tendances globales, tandis que des méthodes supervisées, telles que l'analyse discriminante linéaire ou les machines à vecteurs de support (SVM, « *support vector machine* »), sont utilisées pour construire des modèles de classification.

Notre étude [9] met en œuvre une stratégie de validation rigoureuse, fondée sur des jeux de données indépendants

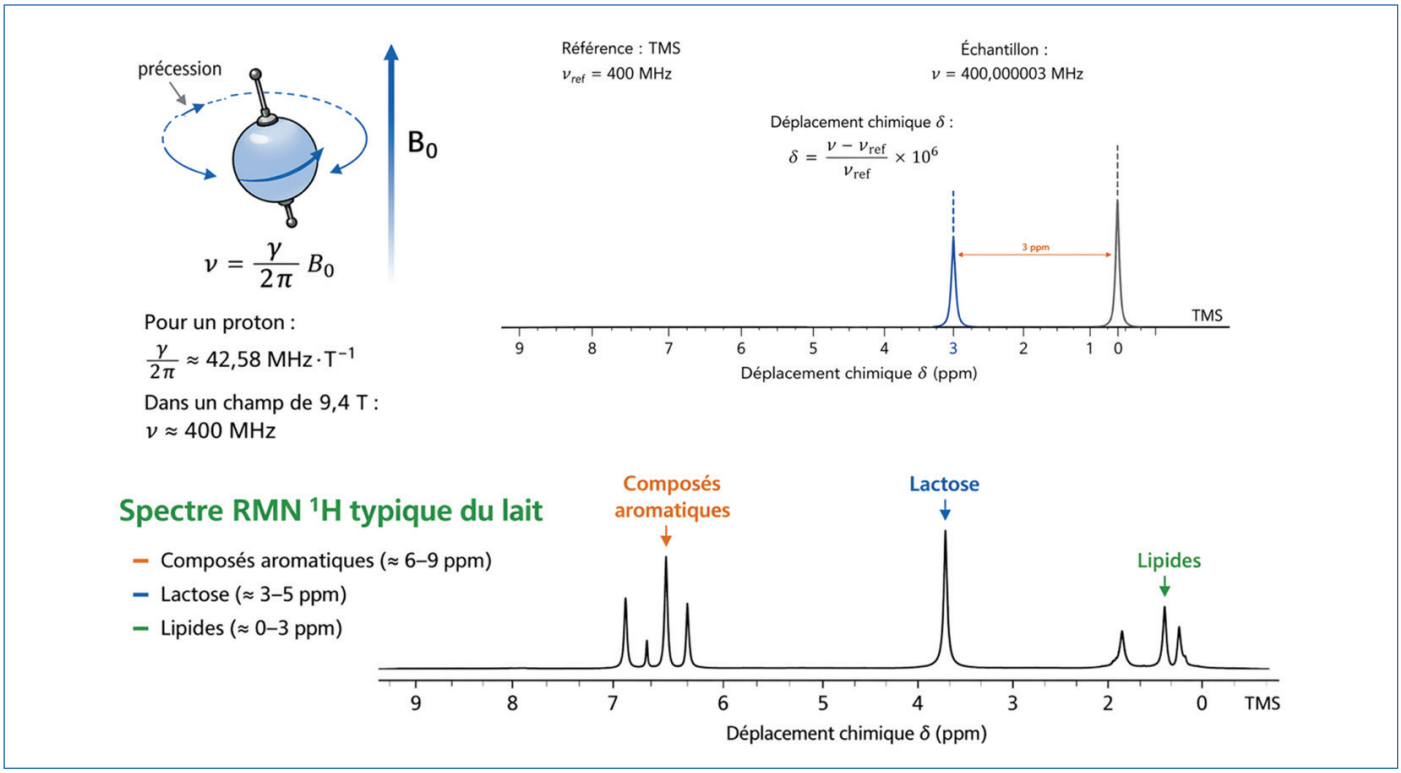


Figure 4 - Illustration des principes de la RMN, notamment fréquence de Larmor, déplacement chimique, et représentation typique d'un spectre RMN ^{1}H du lait.

	NER (%)	Spécificité (%)	Sensibilité (%)
Analyse dicriminante linéaire	84,7	86,2	92,3
Machine à vecteurs de support – fonction linéaire	86,8	97,4	75,7
Machine à vecteurs de support – fonction polynomiale	92,1	94,8	89,2
Machine à vecteurs de support – fonction de base radiale	95,4	96,1	94,6
Réseaux neuronaux artificiels – sans rétroaction	90,1	94,8	85,1
Réseaux neuronaux artificiels – carte auto-organisatrice	89,4	92,2	86,5
Performance	92,7	96,1	89,2

Tableau I - Performance de validation détaillée des modèles linéaires et non linéaires sur le lait UHT (biologique *vs* conventionnel). NER : taux de non-erreur, spécificité et sensibilité (%). D'après [9].

et des procédures de validation croisée, conformément aux recommandations méthodologiques en apprentissage statistique [18]. Les résultats montrent que les modèles fondés sur les isotopes ou sur la RMN atteignent individuellement des performances élevées, avec des taux de bonne classification supérieurs à 90 % (*tableau I*).

Cependant, l'apport majeur de ces travaux réside dans la combinaison des deux types d'information. En intégrant les prédictions issues des modèles isotopiques et métaboliques dans une règle de décision simple (voir l'équation ci-après), les performances sont encore améliorées, atteignant environ 96 % sur les données de test. Cette approche illustre parfaitement le principe selon lequel la coopération de modèles complémentaires de prédiction permet de renforcer la robustesse du processus de classification [19].

Une règle de décision a été calculée pour la classification en combinant les résultats SMRI et RMN. Pour le lait UHT, la formule utilisée est la suivante :

$$\text{Classe}_{\text{Lait}} = \text{Scores(Bio)}_{\text{SMRI linéaire}} + 0{,}5\ \text{Scores(Bio)}_{\text{RMN linéaire}} + 0{,}5\ \text{Scores(Bio)}_{\text{RMN non linéaire}}$$

Cette règle de décision indique que si la valeur $\text{Classe}_{\text{Lait}}$ est inférieure à 1, l'échantillon est classé comme conventionnel, tandis que si $\text{Classe}_{\text{Lait}}$ est supérieure à 1, il est classé comme biologique. En utilisant cette approche combinée, la performance de classification est améliorée par rapport à l'utilisation d'une seule technique, comme illustré dans le *tableau II*. Le taux d'erreur a été réduit à 3 % sur l'ensemble d'entraînement, sans aucune erreur pour le biologique revendiquée, et un taux d'erreur de 3,5 % a été observé sur l'ensemble test.

La règle de décision que nous avons établie et validée expérimentalement repose sur une fusion tardive des scores issus des modèles SMRI et RMN. Le modèle SMRI linéaire reçoit un poids de 1, tandis que les deux modèles RMN, linéaire et non linéaire, reçoivent chacun un poids de 0,5. Ce choix permet d'attribuer une contribution globale équivalente aux deux plateformes analytiques. En effet, l'information RMN étant représentée par deux modèles complémentaires mais partiellement redondants, leur attribuer à chacun un poids de 1 aurait conduit à surpondérer artificiellement la RMN dans la décision finale. Les deux scores RMN sont combinés sous forme d'une moyenne pondérée qui est ensuite additionnée à la contribution SMRI qui constitue une source indépendante d'information. Cette règle présente l'avantage d'être simple, interprétable et cohérente avec la complémentarité chimique des deux techniques analytiques.

Comprendre plutôt que simplement classer : vers des outils opérationnels de contrôle

Au-delà des performances de classification, l'un des intérêts majeurs de cette approche est qu'elle permet de proposer une

Tableau II - Performance du modèle pour chaque technique séparément et avec l'approche combinée. D'après [9]. N : nombre d'échantillons ; NER : taux de non-erreur ; Global-NER : taux de non-erreur approche combinée.

Phase	N (total)	SMRI – NER (%)	RMN – NER (%)	Global-NER (%)	Étendue (min–max, %)
Calibration	171	97,1	98,8	97,1	97,1–98,8
Test	172	94,8	95,3	96,5	94,8–96,5

interprétation mécanistique des différences observées. Les résultats suggèrent en effet une chaîne de causalité cohérente entre le mode de production et la composition chimique du lait.

Les signatures isotopiques reflètent principalement l'alimentation et l'environnement, tandis que les profils RMN traduisent les conséquences métaboliques de ces facteurs. L'ensemble forme une image intégrée du système de production, dans laquelle chaque technique apporte une pièce du puzzle. Cette capacité à relier les observations analytiques à des mécanismes biologiques constitue un atout majeur, notamment dans une perspective de développement d'outils d'aide à la décision ou de contrôle réglementaire.

Les résultats obtenus ouvrent des perspectives intéressantes pour le développement de méthodes opérationnelles d'authentification des produits alimentaires. La combinaison de techniques analytiques robustes et de modèles statistiques validés permet d'envisager la mise en place de systèmes de contrôle fondés sur des données objectives et reproductibles.

L'extension de l'approche à des échantillons européens montre que la méthode conserve une bonne capacité de généralisation, bien que des variations liées aux contextes locaux soient observées. Ces résultats soulignent l'importance de constituer des bases de données représentatives et de prendre en compte la diversité des systèmes agricoles.

À plus long terme, cette approche pourrait être étendue à d'autres matrices alimentaires, contribuant ainsi à renforcer la transparence et la confiance dans les filières biologiques.

L'authentification des produits biologiques représente un défi scientifique majeur, à l'interface entre chimie analytique, sciences des données et sciences alimentaires. Les travaux présentés démontrent qu'il est possible de dépasser les approches traditionnelles en exploitant la richesse des données chimiques à l'aide de méthodes avancées de traitement de l'information.

En combinant spectrométrie de masse isotopique, RMN du proton et intelligence artificielle, cette approche permet de capturer l'empreinte globale des systèmes de production et d'atteindre des niveaux de performance élevés dans la discrimination entre laits biologiques et conventionnels.

Au-delà du cas du lait, ces résultats illustrent l'émergence d'une nouvelle manière de penser l'analyse chimique des aliments, dans laquelle la notion d'authenticité devient un objet scientifique à part entière.

Notes et références

[a] *La santé vient en mangeant - Le guide alimentaire pour tous. Repères de consommation correspondant aux objectifs du plan national nutrition santé*, https://sante.gouv.fr/IMG/pdf/guide_alimentairetous.pdf

[b] Les plantes C3 et C4 sont deux types de plantes qui se distinguent par leur mécanisme de fixation du CO_2 lors de la photosynthèse, les C3 fixant le carbone en composé à trois carbones et les C4 en composé à quatre carbones, avec des signatures isotopiques $\delta^{13}C$ différentes.

[1] V. Vigar *et al.*, A systematic review of organic versus conventional food consumption: is there a measurable benefit on human health?, *Nutrients*, **2019**, *12*(1), 7, https://doi.org/10.3390/nu12010007

[2] H. Willer, J. Trávníček, B. Schlatter (eds.), *The World of Organic Agriculture: Statistics and Emerging Trends 2024*, FiBL & IFOAM – Organics International, **2024**, www.fibl.org/en/shop-en/1747-organic-world-2024

[3] S. Li, A. Ye, H. Singh, Seasonal variations in composition, properties, and heat-induced changes in bovine milk in a seasonal calving system, *J. Dairy Sci.*, **2019**, *102*, p. 7747-59, https://doi.org/10.3168/jds.2019-16685

[4] N. Liu *et al.*, Evaluation of portable near-infrared spectroscopy for organic milk authentication, *Talanta*, **2018**, *184*, p. 128-35, https://doi.org/10.1016/j.talanta.2018.02.097

[5] E. Capuano, J. Rademaker, H. van den Bijgaart, S. M. van Ruth, Verification of fresh grass feeding, pasture grazing and organic farming by FTIR spectroscopy analysis of bovine milk, *Food Res. Int.*, **2014**, *60*, p. 59-65, https://doi.org/10.1016/j.foodres.2013.12.024

[6] J. Molkentin, Authentication of organic milk using $\delta^{13}C$ and the α-linolenic acid content of milk fat, *J. Agric. Food Chem.*, **2009**, *57*, p. 785-90, https://doi.org/10.1021/jf8022029

[7] I.-M. Chung *et al.*, A case study for geographical indication of organic milk in Korea using stable isotope ratios-based chemometric analysis, *Food Control*, **2020**, *107*, 106755, https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2019.106755

[8] G. Cantalapiedra-Hijar *et al.*, Nitrogen isotopic fractionation as a biomarker for nitrogen use efficiency in ruminants: a meta-analysis, *Animal*, **2018**, *12*, p. 1827-37, https://doi.org/10.1017/S1751731117003391

[9] C. B. Y. Cordella *et al.*, A multi-technique chemometric strategy for authenticating organic UHT-treated cow milk, *Food Control*, **2026**, *187*, 112126, https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2026.112126

[10] A. C. Abreu, I. Fernández, NMR metabolomics applied on the discrimination of variables influencing tomato (*Solanum lycopersicum*), *Molecules*, **2020**, *25*, 3738, https://doi.org/10.3390/molecules25163738

[11] C. G. Tsiafoulis *et al.*, NMR-based metabolomics of the lipid fraction of organic and conventional bovine milk, *Molecules*, **2019**, *24*, 1067, https://doi.org/10.3390/molecules24061067

[12] B. H. Schwendel *et al.*, Fatty acid profile differs between organic and conventionally produced cow milk independent of season or milking time, *J. Dairy Sci.*, **2015**, *98*(3), p. 1411-25, https://doi.org/10.3168/jds.2014-8322

[13] E. Capuano, R. Gravink, R. Boerrigter-Eenling, S. M. van Ruth, Fatty acid and triglycerides profiling of retail organic, conventional and pasture milk: implications for health and authenticity, *Int. Dairy J.*, **2015**, *42*, p. 58-63, https://doi.org/10.1016/j.idairyj.2014.11.002

[14] D. Alves da Cunha, T. C. Valim, P. R. Filgueiras, V. Lacerda Junior, A. C. Neto, Lactose quantification in bovine milk by nuclear magnetic resonance without deuterated solvent (No-D qNMR), *Anal. Methods*, **2020**, *12*, p. 4892-98, https://doi.org/10.1039/d0ay01268h

[15] A. Elgersma, S. Tamminga, G. Ellen, Modifying milk composition through forage, *Anim. Feed Sci. Technol.*, **2006**, *131*, p. 207-25, https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2006.06.012

[16] L. J. Sanchez, D. Zhu, R. Frew, B. Kebede, Optimization of nuclear magnetic resonance and gas chromatography-mass spectrometry-based fingerprinting methods to characterize goat milk powder, *J. Dairy Sci.*, **2021**, *104*(1), p. 102-11, https://doi.org/10.3168/jds.2020-18467

[17] N. P. Nørskov, I. Givens, S. Purup, S. Stergiadis, Concentrations of phytoestrogens in conventional, organic and free-range retail milk in England, *Food Chem.*, **2019**, *295*, p. 1-9, https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2019.05.081

[18] S. Arlot, A. Celisse, A survey of cross-validation procedures for model selection, *Stat. Surv.*, **2010**, *4*, p. 40-79, https://doi.org/10.48550/arXiv.0907.4728

[19] S. Erich *et al.*, Combined chemometric analysis of ^{1}H NMR, ^{13}C NMR and stable isotope data to differentiate organic and conventional milk, *Food Chem.*, **2015**, *188*, p. 1-7, https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2015.04.118

Les réactions d'oxydation en milieu homogène

Des alternatives durables aux catalyseurs à base de palladium

Naba ABUHAFEZ, Inderpal YADAV[a] et Rafael GRAMAGE-DORIA[b]

Institut des Sciences Chimiques de Rennes, UMR 6226, CNRS, Université de Rennes.
✉ rafael.gramage-doria@univ-rennes.fr
[a] https://orcid.org/0000-0001-7145-493X ; [b] https://orcid.org/0000-0002-0961-4530

Résumé L'oxydation des oléfines en composés carbonylés, communément désignée sous le nom de réaction de Wacker, constitue une transformation clé pour l'accès à de nombreux produits et intermédiaires à forte valeur ajoutée. Historiquement, cette réaction repose sur l'utilisation de catalyseurs à base de palladium. Or la très faible abondance de ce métal dans la croûte terrestre, son coût élevé et les enjeux géopolitiques associés à son extraction motivent aujourd'hui la recherche d'alternatives plus durables. Cet article propose un panorama des développements récents visant à substituer le palladium par des catalyseurs à base de fer et de cobalt, métaux plus abondants et économiquement plus accessibles.

Mots-clés **Oxydation, palladium, fer, cobalt, porphyrine.**

Abstract **Oxidation reactions in a homogeneous medium: sustainable alternatives to palladium-based catalysts**
The oxidation of olefins to carbonyl compounds, commonly referred to as the Wacker reaction, represents a key transformation for accessing numerous high-value products and intermediates. Historically, this reaction has relied on palladium-based catalysts. However, the extremely low abundance of palladium in the Earth's crust, its high cost, and the geopolitical issues associated with its extraction have driven the search for more sustainable alternatives. This article provides an overview of recent developments aimed at replacing palladium with iron- and cobalt-based catalysts, which rely on more abundant and economically accessible metals.

Keywords **Oxidation, palladium, iron, cobalt, porphyrin.**

https://doi.org/10.63133/scf.act-chim.2026.520.02

La réaction de Wacker catalysée par le palladium : origines et développements

L'oxydation de matières premières issues de l'industrie pétrochimique demeure l'un des procédés les plus importants pour la valorisation initiale de substrats très faiblement fonctionnalisés. Dans ce contexte, l'introduction de fonctions carbonylées dans les oléfines constitue une stratégie centrale, les cétones et les aldéhydes représentant des plateformes chimiques privilégiées pour l'élaboration de produits et d'intermédiaires à plus forte valeur ajoutée [1]. À titre d'exemple, les réactions d'hydroformylation ou de carbonylation catalysées par des complexes de cobalt, de palladium ou de rhodium conduisent à des composés carbonylés comportant un atome de carbone supplémentaire par rapport à l'oléfine de départ [2]. À l'inverse, le procédé de Wacker, catalysé par le palladium, permet l'oxydation des oléfines sans modification du nombre d'atomes de carbone du substrat initial.

L'oxydation de type Wacker des oléfines a été développée dans les années 1950 par des chimistes de la société allemande Wacker Chemie (*figure 1*) [3]. Le schéma réactionnel repose sur l'association de réactifs simples, tels que l'eau et le dioxygène, réagissant avec une oléfine en présence de quantités catalytiques d'un complexe de palladium et d'un co-catalyseur à base de cuivre [4]. D'un point de vue mécanistique, la réaction suit un cycle catalytique Pd(II)/Pd(0), dans lequel l'eau intervient comme nucléophile, tandis que le cuivre et le dioxygène assurent la réoxydation du palladium, permettant ainsi la fermeture du cycle catalytique et la réalisation de multiples tours catalytiques. À l'échelle industrielle, cette réaction est

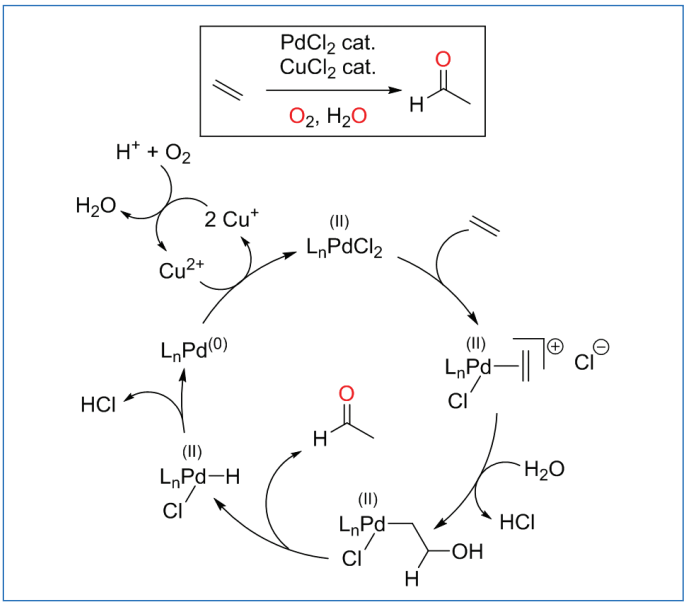


Figure 1 - Oxydation de l'éthylène en acétaldéhyde catalysée par le palladium, développée dans les années 1950 par Wacker Chemie, et mécanisme réactionnel associé reposant sur des transferts à deux électrons. L = H_2O et/ou Cl^-, cat. : quantité catalytique.

mise en œuvre à très grande échelle pour l'oxydation de l'éthylène, l'oléfine la plus simple, en acétaldéhyde, ce dernier constituant une plateforme chimique majeure. L'acétaldéhyde est notamment un précurseur de l'acide acétique (vinaigre) et un intermédiaire clé pour la production de plastiques, peintures, résines, revêtements, ainsi que de parfums, fragrances et médicaments.

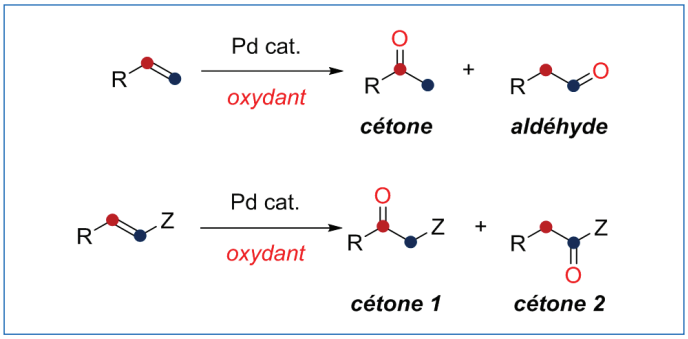


Figure 2 - Considérations de sélectivité lors de l'emploi d'oléfines non symétriques dans les réactions palladocatalysées de type Wacker. cat. : quantité catalytique.

Cependant, l'utilisation d'oléfines plus complexes peut conduire à plusieurs produits, selon le site d'attaque nucléophile de l'eau sur l'oléfine (*figure 2*) [5]. Par exemple, les oléfines terminales peuvent donner des mélanges de cétones, résultant de la sélectivité dite Markovnikov, et d'aldéhydes, issus d'une sélectivité anti-Markovnikov. Aujourd'hui, plusieurs méthodologies permettent d'ajuster précisément la régiosélectivité de la réaction, par l'emploi de ligands spécifiques fixés au palladium, ainsi que par l'utilisation d'additifs favorisant (ou inhibant) l'une ou l'autre des trajectoires réactionnelles. Cette approche est particulièrement pertinente pour l'industrie des produits fins, afin de préparer des cétones prochirales pouvant être transformées en alcools ou amines chiraux selon des protocoles bien établis. Dans le cas des oléfines internes, deux cétones différentes (cétone 1 et cétone 2, *figure 2*) peuvent être obtenues si le substrat de départ n'est pas symétrique. Pour ces composés, la différence de contraintes stériques et électroniques entre les atomes de carbone de l'oléfine est quasi négligeable, ce qui fait du contrôle de la régiosélectivité un défi majeur dans ce domaine.

Bien que les oxydations de type Wacker catalysées par le palladium soient largement mises en œuvre à la fois dans l'industrie et dans les laboratoires académiques, l'utilisation de complexes de palladium comme catalyseur soulève des questions quant à la durabilité de ces procédés [6]. Il convient de rappeler que le palladium est extrait de mines *via* des procédés électrochimiques très énergivores, et que sa répartition géographique sur la planète engendre d'importants enjeux géopolitiques. De plus, la faible abondance de ce métal dans la croûte terrestre (0,015 ppm) contribue à son coût élevé, le rendant difficilement accessible à moyen ou long terme. D'un point de vue pratique, les oxydations de type Wacker catalysées par le palladium nécessitent des pressions élevées d'oxygène sous conditions acides, ce qui pose à la fois des problèmes de sécurité et une faible tolérance aux groupes fonctionnels lorsque les oléfines contiennent d'autres motifs chimiques utiles. Par conséquent, d'un point de vue chimie verte et économique, il apparaît tout à fait pertinent de remplacer les catalyseurs à base de palladium par des systèmes issus de métaux abondants et abordables.

Contributions pionnières avec des catalyseurs à base de fer : oxydation des oléfines en aldéhydes

À cet égard, les complexes de fer semblent adaptés pour remplacer le palladium, car le fer est présent dans la croûte terrestre à hauteur de 56 300 ppm, soit sept ordres de grandeur de plus que le palladium. Cela se traduit par plus d'un milliard de tonnes de fer extraites chaque année, seulement

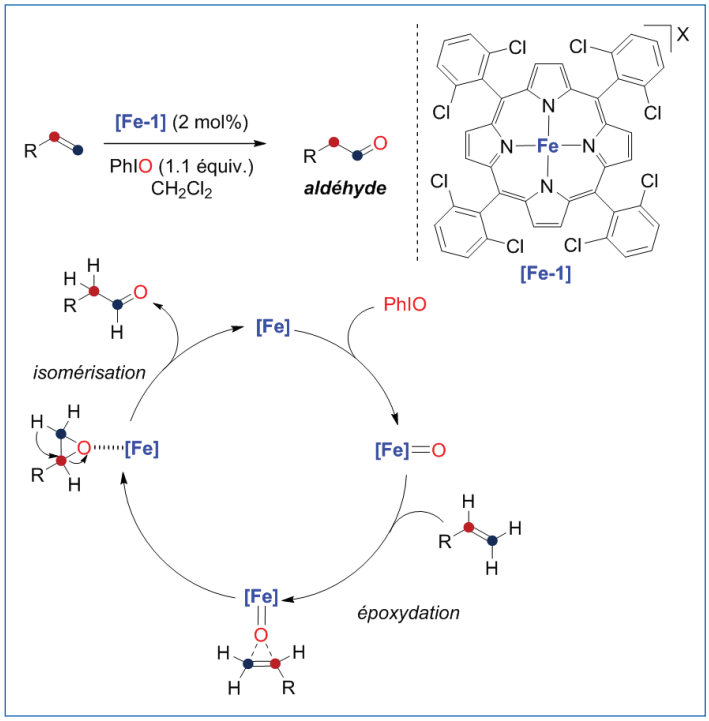


Figure 3 - Premiers exemples d'oxydation de type Wacker des oléfines en aldéhydes catalysée par le fer et considérations mécanistiques expliquant la sélectivité anti-Markovnikov observée. X : anion faiblement coordinant (BArF, OTf, BF_4, PF_6 ou SbF_6).

devancées par le carbone. Cependant, rendre les catalyseurs à base de fer efficaces pour l'oxydation des oléfines n'a été accompli que relativement récemment, en 2011, par le laboratoire de Chi-Ming Che à Shanghai [7]. À cette fin, ils ont développé une série de complexes de fer(III) basés sur des ligands porphyrines (**Fe-1**, *figure 3*). Ces complexes se sont révélés être de puissants catalyseurs pour l'oxydation des oléfines terminales, qu'elles soient aromatiques ou aliphatiques, en aldéhydes correspondants, avec une sélectivité anti-Markovnikov. Les réactions catalytiques nécessitaient la présence de l'iodosobenzène (PhIO) en quantité stœchiométrique comme source d'oxygène pour le produit final, ce qui constitue un oxydant plus puissant comparé à l'eau ou au dioxygène utilisés dans l'oxydation classique de Wacker catalysée par le palladium. D'un point de vue mécanistique, les oxydations anti-Markovnikov catalysées par le fer se déroulent *via* la formation initiale d'espèces fer(IV)-oxo, qui réagissent avec l'oléfine pour donner l'époxyde, lequel subit ensuite une isomérisation pour former l'aldéhyde. Une nouvelle génération de catalyseurs fer-porphyrine a permis l'utilisation de H_2O_2, plus doux que le PhIO, mais uniquement avec des oléfines aromatiques plus réactives, telles que les dérivés du styrène [8].

D'autres études ont montré que d'autres complexes de fer pouvaient également convenir à de tels procédés. Notamment, les catalyseurs enzymatiques de type hème, développés par évolution dirigée par le groupe de Frances A. Arnold, ont montré une excellente sélectivité anti-Markovnikov avec des nombres de turnover très élevés, bien que le mécanisme réactionnel suive une voie différente, dont la discussion dépasse le cadre de cette contribution [9].

Développement de catalyseurs à base de fer pour l'oxydation sélective des oléfines en cétones

Les systèmes catalytiques à base de fer permettant une sélectivité de type Markovnikov, c'est-à-dire la formation de

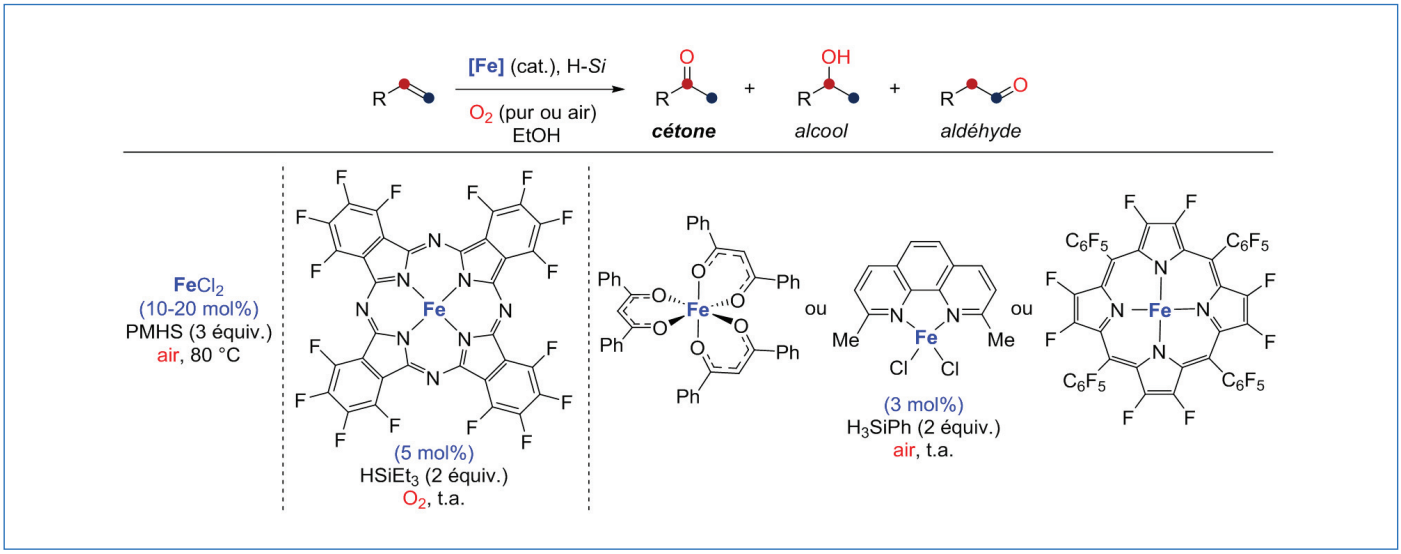


Figure 4 - Exemples d'oxydation de type Wacker des oléfines en cétones catalysée par des complexes à base de fer. t.a. : température ambiante, H-*Si* : hydrosilane.

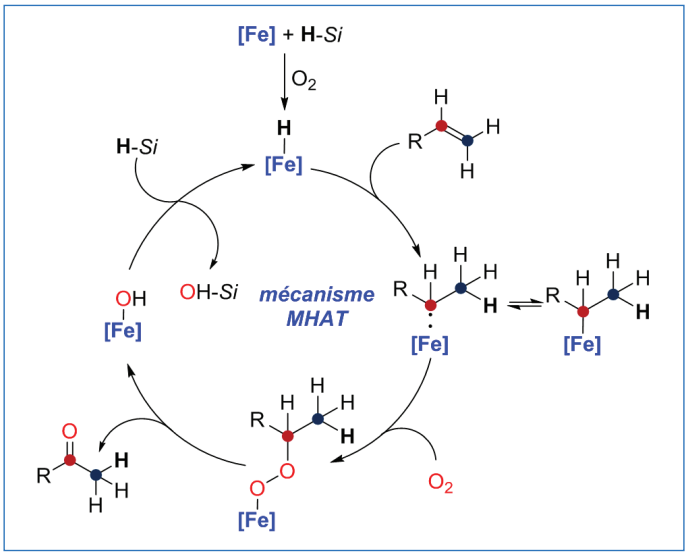


Figure 5 - Considérations mécanistiques expliquant la sélectivité Markovnikov observée lors de l'oxydation de type Wacker des oléfines en cétones catalysée par des complexes à base de fer. MHAT : transfert d'atome d'hydrogène métal-hydrure (« *metal-hydride hydrogen atom transfer* »).

cétones à partir d'oléfines terminales, sont restés longtemps inaccessibles jusqu'à récemment (*figure 4*). En 2017, Wei Han et ses collaborateurs ont montré qu'un simple sel de $FeCl_2$ pouvait agir comme catalyseur pour cette transformation en présence d'air, à haute température, dans un solvant éthanol [10]. Il est important de noter que la réaction nécessitait l'utilisation d'un hydrosilane dont l'atome d'hydrogène était incorporé dans le carbone terminal de la double liaison, tandis que l'oxygène provenant de l'air se retrouvait sur le carbone interne [11]. Cette vision simplifiée est mieux décrite d'un point de vue mécanistique par la formation initiale d'espèces fer(III)-hydrure qui réagissent avec l'oléfine (étape déterminante de la sélectivité Markovnikov), conduisant à la formation d'espèces fer(III)-alkyle *via* un transfert d'atome d'hydrogène métal-hydrure. La présence de dioxygène favorise la formation d'espèces fer-alkyl-peroxo, qui se réarrangent ensuite pour former la cétone méthylique correspondante et générer des espèces fer(III)-hydroxo. Ces dernières réagissent avec l'hydrosilane pour régénérer l'espèce fer(III)-hydrure catalytiquement active (*figure 5*). Han et ses collaborateurs ont démontré que ces réactions étaient compatibles avec un grand nombre de groupes fonctionnels différents présents sur l'oléfine, y compris des produits naturels. Le groupe de Knölker a montré dans une série de travaux que la réactivité du catalyseur à base de fer pouvait être finement modulée par la nature du ligand associé. Cela a permis de réduire la charge en catalyseur de 10-20 mol% à 3-5 mol% en utilisant respectivement des ligands fluorés de type phtalocyanine ou porphyrine, la néocuproïne ou le dibenzoylméthanate [12-14]. Il est également important de souligner que les oxydations, y compris pour les oléfines internes, pouvaient être réalisées dans des conditions douces, à température ambiante. Des expérimentations poussées visant à étudier le mécanisme réactionnel ont été menées, notamment des réactions utilisant des hydrosilanes et du dioxygène isotopiquement marqués, ainsi que des analyses ESI-MS et par spectroscopie Mössbauer ^{57}Fe, démontrant sans ambiguïté le rôle des réactifs et la nature des espèces de fer [11]. Cependant, une formation non négligeable de sous-produits alcool et aldéhyde a été observée dans plusieurs cas. Dans tous ces exemples, les réactions avec des oléfines aliphatiques présentaient des conversions plus faibles que celles avec des oléfines aromatiques.

Dans ce contexte, nos laboratoires ont développé un catalyseur de type porphyrine de fer relativement simple (**Fe-2**, *figure 6*) comportant quatre unités acide carboxylique en périphérie, destinées à augmenter la solubilité du catalyseur dans les milieux alcooliques [15]. De plus, ces fonctionnalités périphériques offrent un environnement électronique approprié pour le centre ferreux, ce qui nous a permis d'observer de manière transitoire des espèces fer-hydrure pertinentes pour la catalyse par spectroscopie RMN. Grâce à ce système, des conversions complètes et une sélectivité remarquable vers la formation de cétones ont été obtenues non seulement pour des substrats aromatiques utiles, mais aussi pour des oléfines aliphatiques et allyliques plus difficiles, y compris l'oléate de méthyle, composé dérivé de la biomasse. Avec ce catalyseur, il a été possible de réduire encore la charge catalytique jusqu'à 1 ppm, conduisant à des nombres de turnovers proches de 200 000 à 50 °C, avec une fréquence de 74 turnovers par heure. Le catalyseur de fer étant très réactif, les réactions pouvaient même être réalisées dans un bain de glace (0 °C). De plus, grâce à un traitement acide/base en fin de réaction, il a été possible de récupérer et de réutiliser le catalyseur

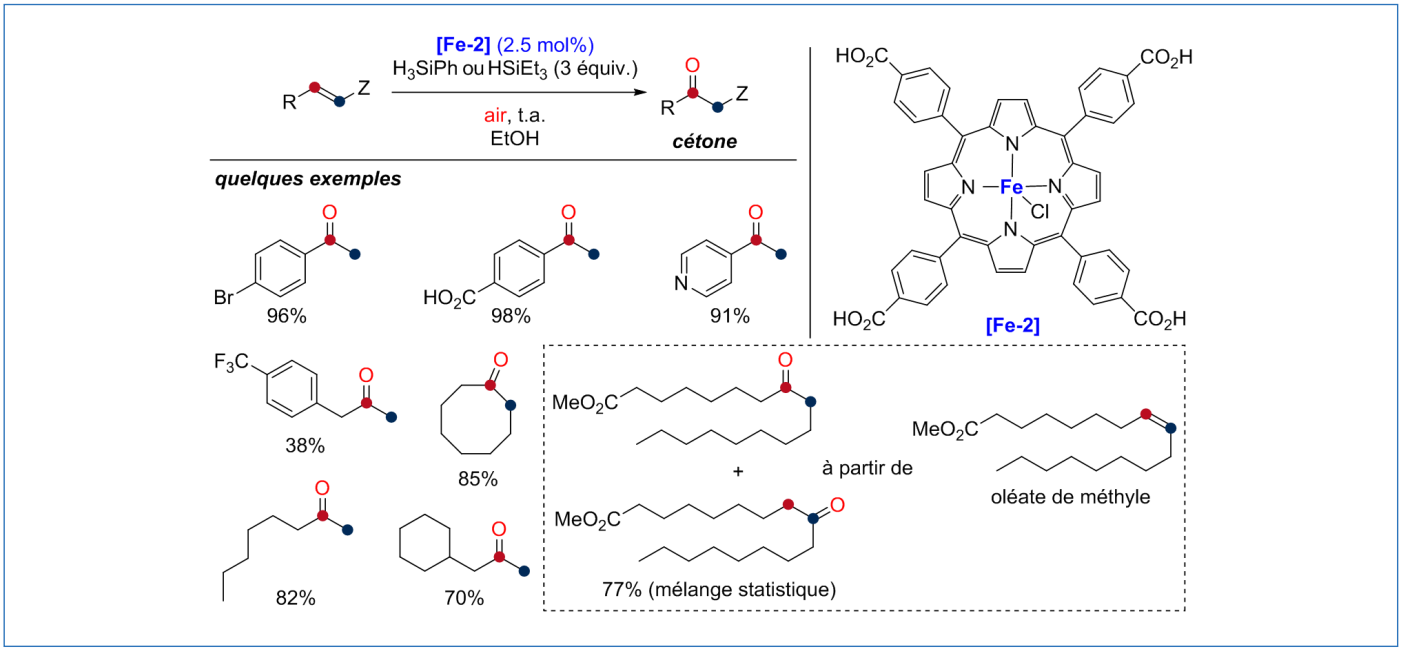


Figure 6 - Oxydation de type Wacker des oléfines en cétones avec la porphyrine de fer **Fe-2**. t.a. : température ambiante.

sur deux cycles. L'ajout de l'hydrosilane en dernier au mélange réactionnel permet une réduction notable de la formation de sous-produits. Il est intéressant de noter que d'autres groupes de recherche ont réussi à encapsuler ce type de catalyseur fer-porphyrine dans des cyclodextrines afin de réaliser ces oxydations dans des conditions de broyage mécanique [16]. Cette approche mécanochimique constitue une alternative encore plus durable aux procédés en batch, conduisant à une réactivité accrue et à une réduction du temps de réaction.

L'essor et les perspectives des catalyseurs au cobalt pour l'oxydation sélective des oléfines en cétones

Un problème fondamental lors de l'utilisation de complexes fer-porphyrine comme catalyseurs réside dans leur forte tendance à se dimériser en présence d'oxygène [17]. L'emploi d'hydrosilanes relativement réactifs tels que $PhSiH_3$ permet de cliver ces espèces di-fer μ-oxo indésirables, conduisant à des complexes mononucléaires catalytiquement actifs. Une alternative au fer est le cobalt, car (1) il est compatible avec les mécanismes MHAT [18], (2) les espèces di-cobalt μ-oxo sont à ce jour inconnues [17], et (3) les groupes de Drago et Matsushita ont montré, indépendamment, au début des années 1980 et 1990, respectivement, que certains complexes de cobalt catalysent l'oxydation des oléfines en cétones, mais de manière non sélective [19,20].

Fort de ces considérations et de la connaissance approfondie acquise en catalyse par le fer, nos laboratoires ont constaté qu'un simple complexe cobalt-tétraphénylporphyrine (**CoTPP**, *figure 7*) présentait une excellente réactivité et sélectivité pour l'oxydation de type Wacker des oléfines terminales en dérivés de cétones méthyliques [21]. Les réactions se déroulaient en présence d'air et en utilisant un hydrosilane plus doux, à savoir Et_3SiH, dans des conditions stœchiométriques atomiquement efficaces, avec des temps de réaction courts (< 1 h) et une faible charge catalytique de 1 mol%. Cela correspond à une fréquence initiale de 864 turnovers par heure, soit près de douze fois plus que pour le catalyseur de fer le plus puissant. Il est important de noter qu'en utilisant seulement 0,001 mol% de catalyseur cobalt, des nombres de turnovers d'environ

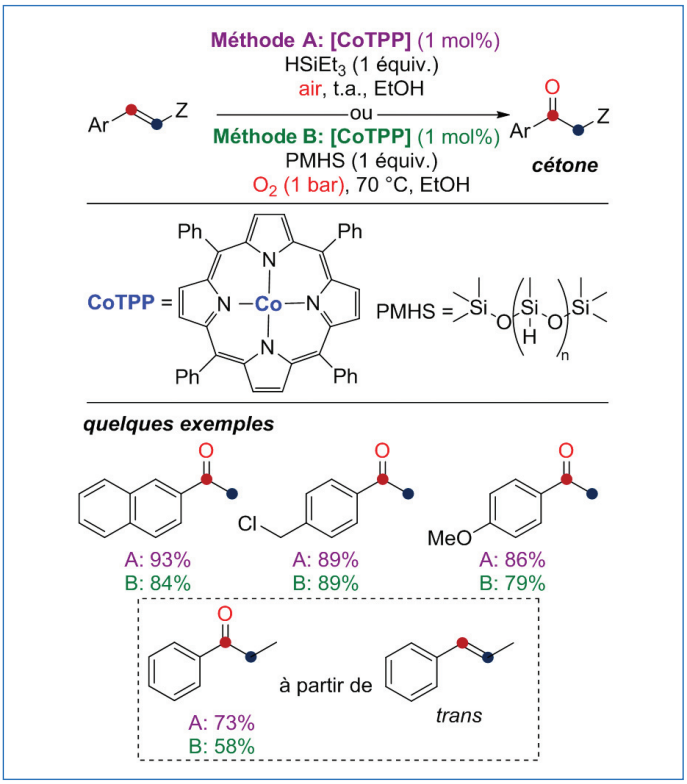


Figure 7 - Oxydation de type Wacker des oléfines en cétones catalysée par la porphyrine de cobalt **CoTPP**. t.a. : température ambiante.

6 000 ont été obtenus. Concernant l'étendue des substrats, les oléfines aliphatiques n'étaient pas compatibles, tandis que des dérivés du styrène portant des groupes complémentaires à ceux testés avec les catalyseurs de fer étaient tolérés. Il a également été possible d'utiliser l'hydrosilane le moins cher possible, le polyméthylhydrosiloxane (PMHS) – un déchet chimique de l'industrie du silicium –, en présence d'une atmosphère pure de O_2 (1 bar) à des températures plus élevées (70 °C) [22]. Toutefois, les quantités de sous-produits alcooliques ont malheureusement augmenté de 1 % jusqu'à 20 % dans certains cas, révélant une voie compétitive d'hydration type Mukaiyama.

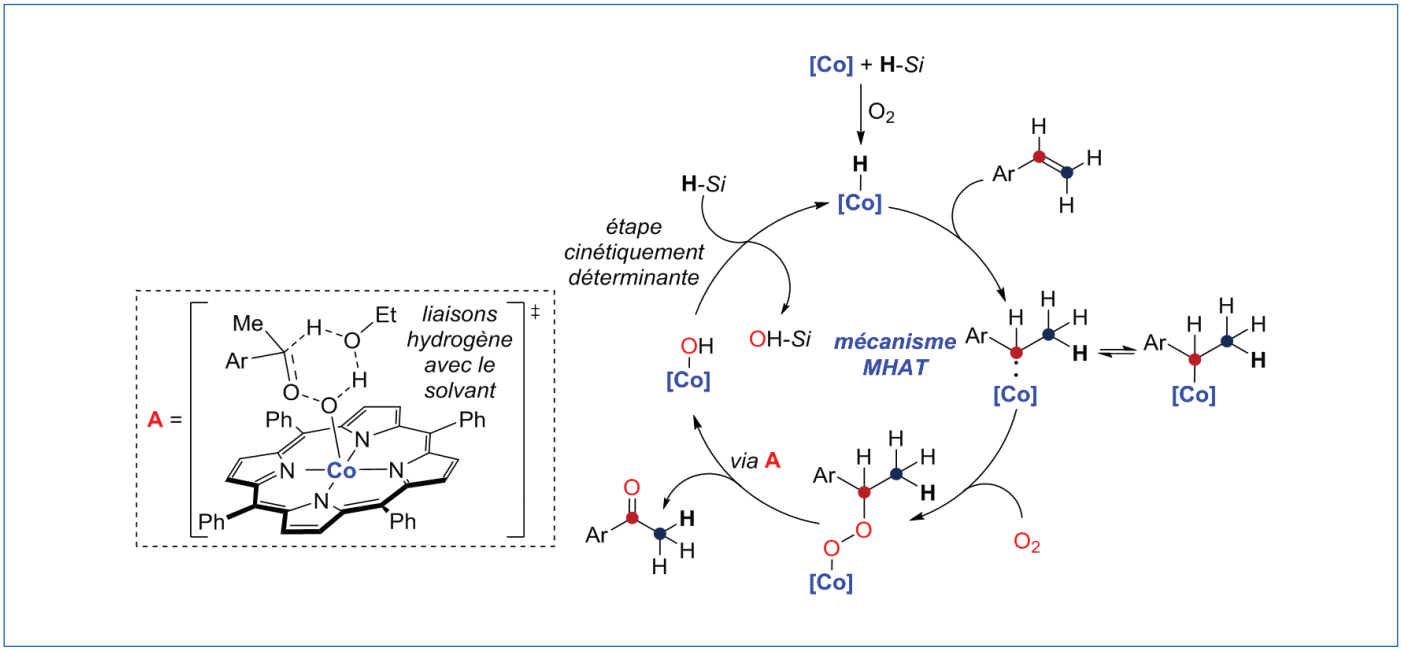


Figure 8 - Considérations mécanistiques expliquant la sélectivité Markovnikov observée lors de l'oxydation de type Wacker des oléfines en cétones catalysée par le cobalt. MHAT : transfert d'atome d'hydrogène métal-hydrure (« *metal-hydride hydrogen atom transfer* »).

Le fait que les oléfines contenant de la pyridine soient non réactives, associé à des études mécanistiques approfondies (cinétique, UV-vis) et à des expériences de contrôle, soutient fortement un mécanisme réactionnel similaire à celui présenté pour le fer, dans lequel la dernière étape du cycle catalytique – la régénération du catalyseur, passant des espèces cobalt-hydroxo au cobalt-hydrure par réaction avec l'hydrosilane – constitue l'étape cinétiquement limitante (*figure 8*) [21]. Cette observation ainsi que la sélectivité de la réaction ont été confirmées par des calculs DFT, qui ont également révélé le rôle unique d'un réseau de liaisons hydrogène médié par l'éthanol (solvant) pour abaisser l'énergie des intermédiaires clés du cycle catalytique. Dans une contribution récente, le niveau de durabilité de ce procédé a été significativement augmenté en encapsulant ces catalyseurs cobalt-porphyrine dans des polymères, permettant de réaliser des oxydations similaires en régime hétérogène et de recycler le catalyseur polymère jusqu'à huit fois [23].

Vers un avenir plus durable et efficace pour les réactions d'oxydation catalytique

Comme résumé dans cet article, la possibilité de remplacer les catalyseurs au palladium par des catalyseurs beaucoup plus respectueux de l'environnement, à base de fer et de cobalt, est aujourd'hui une réalité. Cela pourrait transformer la manière dont les matériaux contenant des groupes carbonyle sont préparés au quotidien dans les laboratoires et ouvrir la voie à un changement de paradigme dans la production industrielle de cétones et d'aldéhydes, tels que l'acétaldéhyde ou l'acétone, produits chaque année à l'échelle de plusieurs millions de tonnes. Ces développements, qui pourraient trouver des applications à court ou moyen terme, ont été rendus possibles grâce à la compréhension fondamentale du fonctionnement des catalyseurs métalliques, permettant de concevoir de manière rationnelle des systèmes catalytiques supérieurs. La conception de nouveaux ligands et la mise en œuvre de systèmes hétérogènes devraient ouvrir la voie à la découverte de catalyseurs plus puissants à base de métaux de transition de la première série, capables de réaliser l'oxydation catalytique durable des oléfines en produits carbonylés à forte valeur ajoutée.

Remerciements

Ces travaux ont bénéficié d'un support financier du Centre National de la Recherche Scientifique (CNRS), de CNRS Innovation (projet pré-maturation), de l'Université de Rennes, de la Région Bretagne (ARED 2020 No. 1715) et du Collège de France (PAUSE, pour le doctorat de Naba Abuhafez).

Les auteurs remercient Jonathan Trouvé, ancien doctorant, Khalil Youssef et Sitthichok Kasemthaveechok, anciens étudiants de master, qui avaient démarré cette thématique au laboratoire.

[1] F. Shi, H. Wang, X. Dai (eds), *Carbonyl Compounds: Reactants, Catalysts and Products*, Wiley-VCH, Weinheim, **2021**.

[2] R. Franke, D. Selent, A. Börner, Applied hydroformylation, *Chem. Rev.*, **2012**, *112*, p. 5675-732, https://doi.org/10.1021/cr3001803

[3] J. Smidt *et al.*, Katalytische Umsetzungen von Olefinen an Platinmetall-Verbindungen Das Consortium-Verfahren zur Herstellung von Acetaldehyd, *Angew. Chem.*, **1959**, *71*, p. 176-82, https://doi.org/10.1002/ange.19590710503

[4] J. A. Keith, P. M. Henry, The mechanism of the Wacker reaction: a tale of two hydroxypalladations, *Angew. Chem. Int. Ed.*, **2009**, *48*, p. 9038-49, https://doi.org/10.1002/anie.200902194

[5] J. J. Dong, W. R. Browne, B. L. Feringa, Palladium-catalyzed anti-Markovnikov oxidation of terminal alkenes, *Angew. Chem. Int. Ed.*, **2015**, *54*, p. 734-44, https://doi.org/10.1002/anie.201404856

[6] P. Rajeshwaran, J. Trouvé, K. Youssef, R. Gramage-Doria, Sustainable Wacker-type oxidations, *Angew. Chem. Int. Ed.*, **2022**, *61*, e202211016, https://doi.org/10.1002/anie.202211016

[7] G.-Q. Chen, Z.-J. Xu, C.-Y. Zhou, C.-M. Che, Selective oxidation of terminal aryl and aliphatic alkenes to aldehydes catalyzed by iron(III) porphyrins with triflate as a counter anion, *Chem. Commun.*, **2011**, *47*, p. 10963-65, https://doi.org/10.1039/c1cc13574k

[8] Y.-D. Du, C.-W. Tse, Z.-J. Xu, Y. Liu, C.-M. Che, [Fe^{III}(TF_4DMAP)OTf] catalysed anti-Markovnikov oxidation of terminal aryl alkenes to aldehydes and transformation of methyl aryl tertiary amines to formamides with H_2O_2 as a terminal oxidant, *Chem. Commun.*, **2014**, *50*, p. 12669-72, https://doi.org/10.1039/c4cc05972g

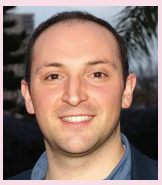
[9] S. C. Hammer *et al.*, Anti-Markovnikov alkene oxidation by metal-oxo–mediated enzyme catalysis, *Science*, **2017**, *358*, p. 215-18, https://doi.org/10.1126/science.aao1482

[10] B. Liu, F. Jin, T. Wang, X. Yuan, W. Han, Wacker-type oxidation using an iron catalyst and ambient air: application to Late-Stage oxidation of complex molecules, *Angew. Chem. Int. Ed.*, **2017**, *56*, p. 12712-17, https://doi.org/10.1002/ange.201707006

[11] F. Puls, F. Seewald, V. Grinenko, H.-H. Klauß, H.-J. Knölker, Mechanistic studies on the hexadecafluorophthalocyanine–iron-catalyzed Wacker-type oxidation of olefins to ketones, *Chem. Eur. J.*, **2021**, *27*, p. 16776-87, https://doi.org/10.1002/chem.202102848
[12] F. Puls, H.-J. Knölker, Conversion of olefins into ketones by an iron-catalyzed Wacker-type oxidation using oxygen as the sole oxidant, *Angew. Chem. Int. Ed.*, **2018**, *57*, p. 1222-26, https://doi.org/10.1002/anie.201710370
[13] F. Puls, P. Linke, O. Kataeva, H. J. Knölker, Iron-catalyzed Wacker-type oxidation of olefins at room temperature with 1,3-diketones or neocuproine as ligands, *Angew. Chem. Int. Ed.*, **2021**, *60*, p. 14083-90, https://doi.org/10.1002/anie.202103222
[14] T. Schuh, O. Kataeva, H.-J. Knölker, μ-Oxo-bis[(octacosafluoro-*meso*-tetraphenylporphyrinato)iron(III)] – synthesis, crystal structure, and catalytic activity in oxidation reactions, *Chem. Sci.*, **2023**, *14*, p. 257-65, https://doi.org/10.1039/d2sc06083c
[15] J. Trouvé, K. Youssef, S. Kasemthaveechok, R. Gramage-Doria, Catalyst complexity in a highly active and selective Wacker-type Markovnikov oxidation of olefins with a bioinspired iron complex, *ACS Catal.*, **2023**, *13*, p. 4421-32, https://doi.org/10.1021/acscatal.3c00593
[16] C. Jiang *et al.*, Supramolecular modulation for selective mechanochemical iron-catalyzed olefin oxidation, *Angew. Chem. Int. Ed.*, **2025**, *64*, e202413901, https://doi.org/10.1002/anie.202413901
[17] A. B. Sorokin, Recent progress on exploring μ-oxo bridged binuclear porphyrinoid complexes in catalysis and material science, *Coord. Chem. Rev.*, **2019**, *389*, p. 141-60, https://doi.org/10.1016/j.ccr.2019.03.016
[18] S. A. Green *et al.*, The high chemofidelity of metal-catalyzed hydrogen atom transfer, *Acc. Chem. Res.*, **2018**, *51*, p. 2628-40, https://doi.org/10.1021/acs.accounts.8b00337
[19] A. Zombeck, D. E. Hamilton, R. S. Drago, Novel catalytic oxidations of terminal olefins by cobalt(II)-Schiff base complexes, *J. Am. Chem. Soc.*, **1982**, *104*, p. 6782-84, https://doi.org/10.1021/ja00388a051
[20] Y. Matsushita, T. Matsui, K. Sugamoto, Cobalt(II) porphyrin-catalyzed oxidation of olefins to ketones with molecular oxygen and triethylsilane in 2-propanol, *Chem. Lett.*, **1992**, p. 1381-84, https://doi.org/10.1246/cl.1992.1381
[21] N. Abuhafez, A. W. Ehlers, B. de Bruin, R. Gramage-Doria, Markovnikov-selective cobalt-catalyzed Wacker-type oxidation of styrenes into ketones under ambient conditions enabled by hydrogen bonding, *Angew. Chem. Int. Ed.*, **2024**, *63*, e202316825, https://doi.org/10.1002/anie.202316825
[22] N. Abuhafez, R. Gramage-Doria, Cobalt-catalyzed Wacker-type aerobic oxidation of olefins into ketones enabled by PMHS: giving value to a chemical waste with optimal atom-economy, *ChemCatChem*, **2024**, *16*, e202400333, https://doi.org/10.1002/cctc.202400333
[23] B. Boro *et al.*, Navigating the bio-inspired structure-function landscape: spectroscopy driven finding of hidden radical oxidation in co-porphyrinic porous organic polymer, *Small Methods*, **2026**, *10*, e01981, https://doi.org/10.1002/smtd.202501981



N. Abuhafez



R. Gramage-Doria

Ancienne doctorante à l'Institut des Sciences Chimiques de Rennes (ISCR), **Naba ABUHAFEZ** a reçu le ***Prix de thèse 2025***, et **Rafael GRAMAGE-DORIA**, chargé de recherche au CNRS à l'ISCR, a reçu le ***Prix Jeune chercheur 2024 de la division Catalyse (DivCat) de la Société Chimique de France***.

Chemistry Europe
European Chemical Societies Publishing

WILEY-VCH

The Journal for Excellence in Chemistry, Open to All

The flagship journal of the Chemistry Europe publishing association



Why publish with *ChemistryEurope?*

- Fully open access for global reach and impact
- **No article publication charges until December 2026**
- Highest publishing standards backed by a team of academic Editors-in-Chief and expert in-house editors
- Rapid dissemination of your research through fast editorial decisions and efficient article processing

The high-impact, open-access complement to *Chemistry — A European Journal*

Illuminer et détruire

Une approche ciblée pour le traitement des métastases du cancer de l'ovaire

Morgane MOINARD

Laboratoire Réactions et Génie des Procédés (LRGP), UMR 7274 CNRS-Université de Lorraine, Nancy.
✉ morgane.moinard@univ-lorraine.fr

Résumé Le cancer de l'ovaire, souvent diagnostiqué à un stade avancé, demeure associé à un taux élevé de récidive en raison de la persistance de résidus tumoraux microscopiques, appelés carcinoses péritonéales, à l'issue du traitement conventionnel. La thérapie photodynamique constitue une approche prometteuse pour cibler ces résidus grâce à l'activation lumineuse de molécules photoactivables (photosensibilisateurs) vectorisées générant des espèces réactives de l'oxygène capables d'induire la mort cellulaire tumorale. Le ciblage utilisant l'acide folique du récepteur au folate alpha, surexprimé dans plus de 70 % des cancers ovariens, permet un traitement sélectif. Afin de pallier l'instabilité de l'acide folique, un nouvel analogue (AAF) a été conçu et couplé à un photosensibilisateur, la pyrophéophorbide a, donnant naissance à un conjugué (PS^{AAF}) doté de propriétés photophysiques optimisées, d'une stabilité accrue et d'une efficacité antitumorale sous illumination. Cette stratégie ouvre la voie à des traitements plus spécifiques visant l'élimination des carcinoses péritonéales ovariennes et à une amélioration du taux de survie des patientes.

Mots-clés **Cancer de l'ovaire, thérapie photodynamique, photosensibilisateur, récepteur au folate alpha, acide folique.**

Abstract **Illuminate and destroy: a targeted approach to treat metastases of ovarian cancer**
Ovarian cancer, often diagnosed at an advanced stage, remains associated with a high recurrence rate due to the persistence of microscopic tumor residues, known as peritoneal carcinomatosis, following conventional treatment. Photodynamic therapy represents a promising approach to target these residues through light activation of targeted photoactivable molecules called photosensitizers that generate reactive oxygen species capable of inducing tumor cell death. Targeting the folate receptor alpha, overexpressed in more than 70% of ovarian cancers, with folic acid enables selective treatment. To overcome the instability of folic acid, a novel analogue (AAF) was designed and conjugated to a photosensitizer, pyropheophorbide a, yielding a compound (PS^{AAF}) with optimized photophysical properties, enhanced stability, and effective antitumor activity under illumination. This strategy paves the way for more specific treatments aimed at eliminating ovarian peritoneal carcinomatosis and improving patient survival.

Keywords **Ovarian cancer, photodynamic therapy, photosensitizer, folate receptor alpha, folic acid.**

https://doi.org/10.63133/scf.act-chim.2026.520.04

Le cancer de l'ovaire : un défi thérapeutique appelant de nouvelles stratégies ciblées

Le cancer de l'ovaire représente un défi thérapeutique majeur, étant le cancer gynécologique le plus meurtrier et le huitième cancer le plus fréquent chez la femme [1]. En effet, il est diagnostiqué dans près de 80 % des cas à un stade avancé, souvent après l'apparition de métastases, aussi appelées carcinoses péritonéales, ce qui compromet le pronostic [2]. De plus, malgré un traitement conventionnel combinant une chirurgie visant à retirer le maximum de tumeur et une chimiothérapie à base de platine, 60 % des patientes récidivent en raison de la persistance de cellules cancéreuses invisibles à l'œil nu, non éliminées [3]. Face à ce constat, il est impératif de développer une approche thérapeutique ciblée permettant d'éradiquer toutes les cellules cancéreuses, y compris microscopiques, tout en limitant les effets indésirables. Parmi les thérapies émergentes, la thérapie photodynamique est une approche très prometteuse, notamment grâce à l'accumulation sélective des molécules photoactivables dans les cellules tumorales.

Qu'est-ce que la thérapie photodynamique ?

Principe

La thérapie photodynamique (PDT) est une technique qui repose sur la combinaison de trois éléments indispensables : une molécule activable par la lumière aussi appelée photosensibilisateur (PS), de la lumière et l'oxygène au niveau de la zone tumorale.

La PDT consiste premièrement en l'administration du PS au patient, par voie cutanée, intraveineuse ou par voie orale, en fonction de la pathologie à traiter. Ce PS, après un temps d'incubation dépendant du type de cancer à traiter, a la particularité de s'accumuler préférentiellement au niveau des tissus malades. Une lumière d'une longueur d'onde adaptée au spectre d'absorption du PS est ensuite appliquée au niveau de la zone tumorale, ce qui va déclencher l'activation du PS.

Cette activation passe tout d'abord par l'excitation du PS depuis son état fondamental (PS_0) à un état excité singulet (^1PS_n*). Par relaxation vibrationnelle, le PS revient à son état excité singulet de plus basse énergie $^1PS_1$*. Cet état excité

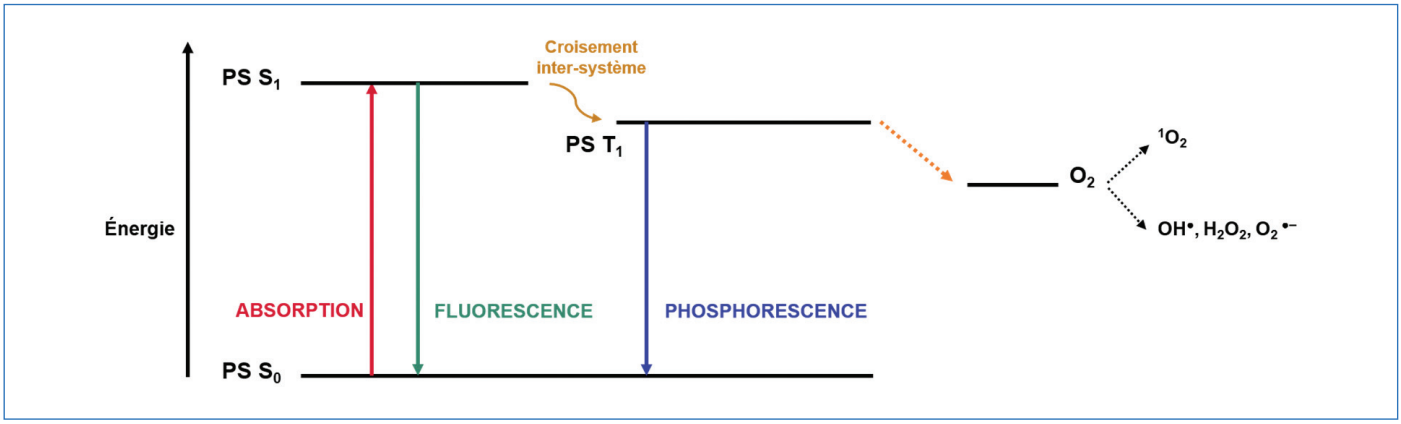


Figure 1 - Diagramme de Perrin-Jablonski simplifié. PS S_0 : état fondamental du photosensibilisateur (PS) ; PS S_1 : état singulet excité du PS ; PS T_1 : état triplet excité du PS ; $^1O_2$: oxygène singulet.

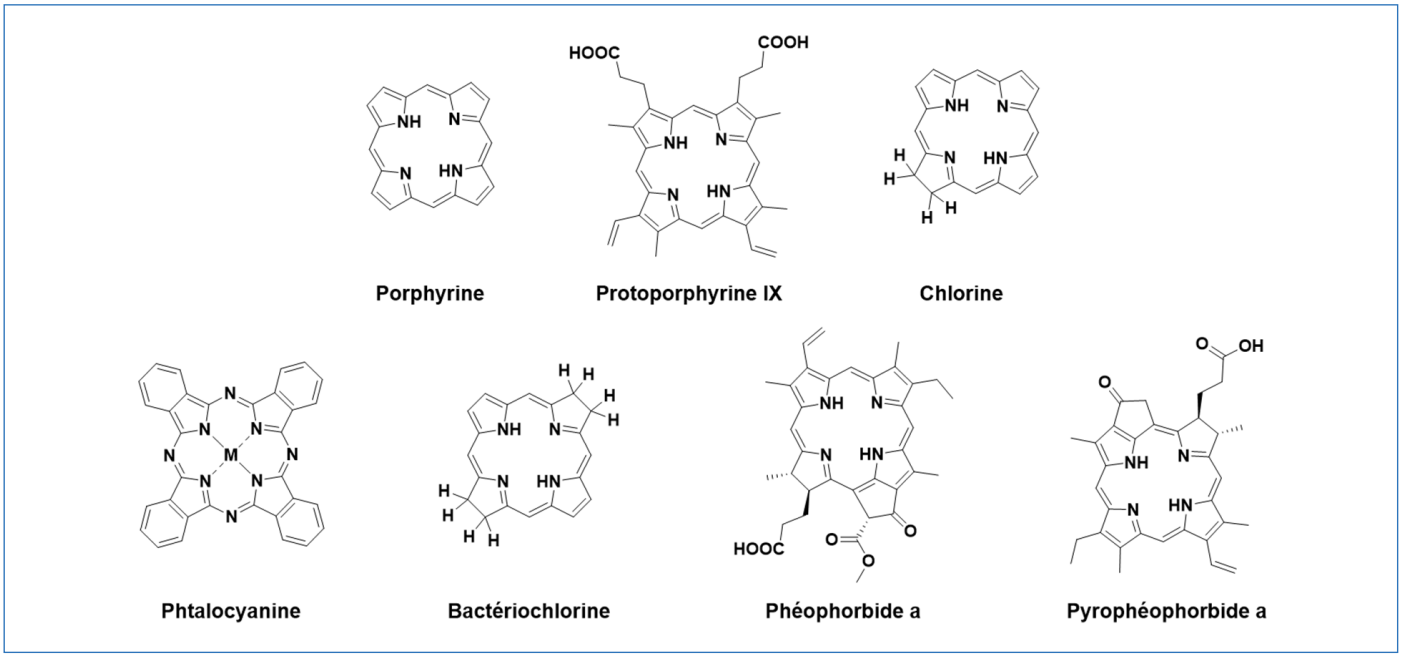


Figure 2 - Structures chimiques de différentes familles de photosensibilisateurs.

étant instable, le PS peut, d'une part, revenir à son état fondamental par relaxation vibrationnelle ou par émission de fluorescence, ou d'autre part, atteindre son état excité triplet ($^3PS_1$*), de durée de vie plus longue que l'état singulet, par croisement inter-système. $^3PS_1$* peut ainsi revenir à son état fondamental par émission de phosphorescence ou par relaxation vibrationnelle, ou bien réagir avec des substrats intracellulaires par transfert d'électrons ou de protons (réaction de type I) ou avec l'oxygène molécule, $^3O_2$, par transfert d'énergie. Ceci conduit à la production d'espèces réactives de l'oxygène (ROS, « *reactive oxygen species* »), telles que l'oxygène singulet ($^1O_2$), toxiques pour les tissus environnants et qui vont ainsi induire la mort des cellules cancéreuses. Le diagramme de Perrin-Jablonski simplifié de la *figure 1* représente les états électroniques du PS et les transitions entre ces états.

Comment choisir un photosensibilisateur adapté ?

Il est commun de définir un bon PS comme une molécule qui doit présenter des propriétés photophysiques adéquates telles qu'un coefficient d'extinction molaire élevé à la longueur d'onde d'excitation, un rendement quantique de fluorescence modéré permettant une chirurgie guidée par fluorescence et des rendements quantiques élevés en état triplet et en formation de ROS. De plus, il est important que le PS soit stable sous illumination pendant le traitement. Sa synthèse doit être la plus simple possible et extrapolable dans un environnement industriel. Le PS ne doit pas s'agréger dans un milieu physiologique ; il doit être non cytotoxique à l'obscurité aux concentrations utilisées, stable vis-à-vis des enzymes circulantes, sélectif des cellules cancéreuses et être rapidement éliminé de l'organisme.

Trois générations de PS ont été développées au cours des dernières décennies. La première génération consiste en un mélange de porphyrines, dérivées de l'hématoporphyrine. Le Photofrin®, qui est un mélange de dimères et d'oligomères de porphyrines, a été le premier PS utilisé cliniquement en 1992. Bien que ces PS démontrent une cytotoxicité élevée envers les cellules cancéreuses, ils présentent un manque de sélectivité pour les tissus tumoraux ainsi qu'une lente élimination de l'organisme, ne répondant pas aux exigences requises.

La deuxième génération de PS consiste en des dérivés de macrocycles tétrapyrroliques synthétiques chimiquement purs, tels que les porphyrines, les chlorines, les phtalocyanines, les texaphyrines, les purpurines, les bactériochlorines et les pyrophéophorbides (*figure 2*). Des colorants tels que le bleu de méthylène ou le rose bengal, peuvent également être utilisés.

Ces PS présentent de meilleures propriétés photophysiques et une meilleure élimination de l'organisme ; en revanche, le manque de sélectivité vis-à-vis des tissus tumoraux reste toujours à optimiser.
Dans ce but, une troisième génération a été développée, qui consiste à coupler un PS, synthétique ou naturel, à un agent de ciblage ou une nanoparticule (NP), ou à l'encapsuler dans une NP en vue d'améliorer la spécificité et l'efficacité du traitement en ciblant plus précisément les cellules cancéreuses tout en minimisant les effets sur les tissus sains.

Quels types de cancers peuvent être traités par thérapie photodynamique ?

Le premier PS approuvé fut le Photofrin®, utilisé dès les années 1990 contre différents cancers (vessie, poumon, œsophage). Dans le domaine de la dermatologie, la PDT est aujourd'hui largement utilisée notamment contre les kératoses actiniques et les carcinomes basocellulaires et épidermoïdes *in situ*, avec des médicaments tels que l'acide aminolévulinique et l'aminolévulinate de méthyle.
Des PS de troisième génération ont été développés par la suite, telle la vertéporfine (2000) qui fut le premier pour le traitement de la dégénérescence maculaire liée à l'âge.
Le cetuximab sarotalocan, un anticorps monoclonal anti-EGFR conjugué à un PS proche infrarouge de troisième génération, est le dernier PS ayant été approuvé cliniquement pour le traitement du cancer de la tête et du cou par la PDT (2020, Japon).

Comment appliquer la thérapie photodynamique au ciblage et au traitement des métastases du cancer de l'ovaire ?

Le récepteur au folate alpha (FRα) représente une cible particulièrement prometteuse en PDT. Bien que son expression soit relativement faible, FRα est présent dans les cellules saines de divers tissus tels que les trompes de Fallope, les reins, les poumons et le placenta [4] (*figure 3*). Toutefois, sa localisation est limitée à la membrane apicale des cellules épithéliales, c'est-à-dire orientée vers l'intérieur des organes, ce qui empêche son exposition aux folates circulants dans le sang [5]. En revanche, plus de 70 % des cancers de l'ovaire surexpriment FRα sur toute la surface cellulaire, permettant un ciblage spécifique et efficace [6]. Cette caractéristique favorise l'accumulation sélective de conjugués dirigés contre FRα dans les cellules tumorales.

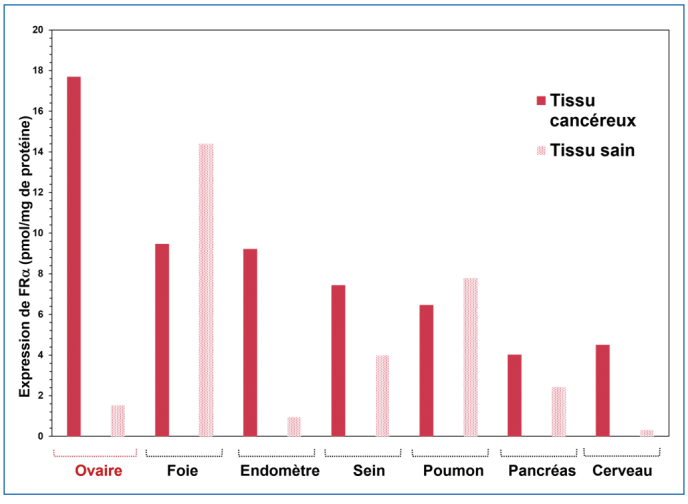


Figure 3 - Niveaux d'expression de FRα dans divers tissus sains et cancéreux.

Actuellement, la seule thérapie approuvée exploitant FRα est le mirvetuximab soravtansine (MIRV), un anticorps conjugué-médicament validé par la FDA (« *Food and Drug Administration* ») en 2022 pour le traitement du cancer de l'ovaire. Toutefois, l'absence d'autres stratégies thérapeutiques ciblant ce récepteur met en évidence la nécessité de développer de nouvelles approches, notamment en PDT.

L'utilisation de l'acide folique comme agent de ciblage

L'acide folique (AF), ou vitamine B9, est indispensable au bon fonctionnement du corps humain. Alors qu'il est présent dans de nombreux aliments, tels que les légumes verts ou les agrumes par exemple, un déficit en AF peut avoir un impact sur la santé et induire différentes maladies tels que la maladie d'Alzheimer [7] ou le développement de cancer [8].

Évolution des photosensibilisateurs conjugués à l'acide folique pour le ciblage de FRα en photothérapie dynamique

Le développement par notre équipe de PS conjugués à l'AF pour une PDT ciblée et sélective a débuté en 2005.
La porphyrine 4-carboxyphényl (TPP-COOH) a été conjuguée à l'AF *via* des bras espaceurs (hexylène ou PEG, polyéthylène glycol), permettant d'aboutir à deux composés : TPP-hex-AF et TPP-PEG-AF [9]. Ce ciblage par l'AF a conduit à une accumulation cellulaire sept fois supérieure à celle de la TPP seule dans les cellules ciblées (cellules KB, lignée cellulaire de carcinome de la tête et du cou). En revanche, les propriétés photophysiques des conjugués sont limitées, la faible fluorescence ne permet pas une détection *in vivo* et les composés présentent une faible stabilité sous illumination.
Pour cela, la *méta*-tétra(hydroxyphényl)chlorine (*m*THPC) a été utilisée comme PS puis couplée à l'AF *via* un bras espaceur de type PEG pour donner *m*-THPC-PEG-AF [10]. Les propriétés photophysiques ont été améliorées, tout en gardant une meilleure sélectivité et une élimination plus rapide du conjugué par rapport à *m*THPC seule *in vivo*.
Par la suite, différentes familles de PS ont été testées pour montrer l'influence que pouvait avoir la structure de ce dernier sur les propriétés photophysiques et biologiques du composé final [11]. L'ensemble de ces travaux a permis de démontrer l'intérêt du couplage de PS à l'AF afin d'améliorer la spécificité tumorale en PDT.

Le choix de la pyrophéophorbide a en tant que photosensibilisateur

L'équipe de Céline Frochot a récemment développé un nouveau PS de troisième génération en couplant la pyrophéophorbide a (Pyro-a) à l'AF *via* un espaceur PEG, nommé Pyro-PEG-AF. Pyro-a se démarque par sa capacité d'absorber la lumière à des longueurs d'onde élevées (690 nm), un rendement quantique de fluorescence $\Phi_F = 0{,}30$ modéré et un rendement quantique de formation de $^1O_2$ $\Phi_\Delta = 0{,}54$ dans l'éthanol convenable. Pyro-PEG-AF a fait l'objet d'un brevet en 2019 [12].

Synthèse d'un analogue de l'acide folique pour le ciblage de FRα

Problématique de la stabilité de l'acide folique

Malgré son importance biologique et thérapeutique, l'AF est connu pour être instable dans diverses conditions

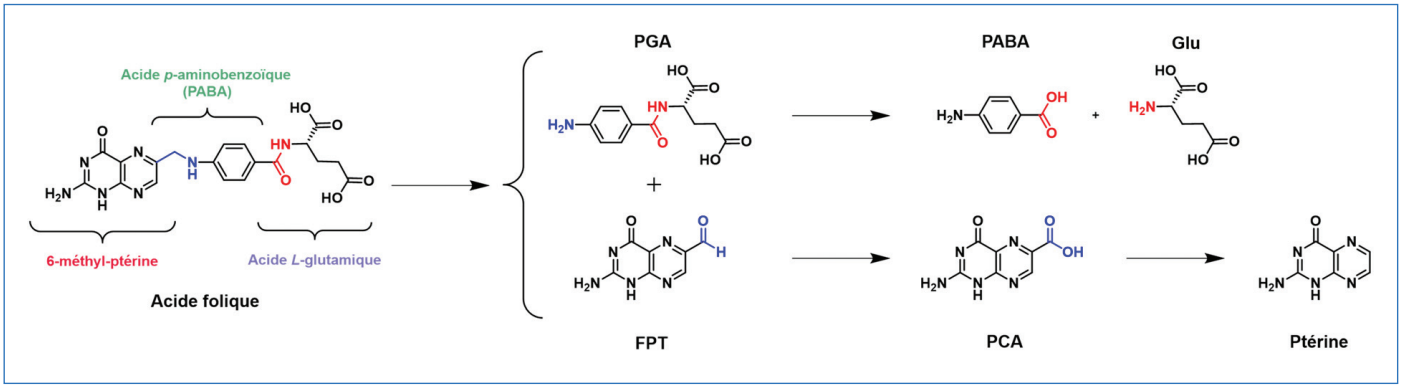


Figure 4 - Les produits de dégradation de l'AF. **PABA** : acide *p*-aminobenzoïque, **Glu** : acide glutamique, **FPT** : 6-formylptérine, **PCA** : acide ptérine-6-carboxylique, **PGA** : acide *p*-aminobenzoyl-L-glutamique.

environnementales, telles qu'une exposition à la lumière ultraviolette (UV), à une température élevée, à un pH acide et à la présence d'oxygène [13]. Cette instabilité peut ainsi poser des problèmes pour sa formulation, son stockage et son efficacité thérapeutique.

La dégradation de l'AF, largement décrite dans la littérature, résulte de la rupture de deux liaisons labiles au sein de sa structure chimique : la liaison amine entre la 6-méthyl-ptérine et l'acide *para*-aminobenzoïque (PABA), et la liaison amide reliant l'acide *p*-aminobenzoïque à l'acide L-glutamique. Ces ruptures conduisent à la formation de trois principaux produits de dégradation : la 6-formylptérine (FPT), l'acide ptérine-6-carboxylique (PCA) et l'acide *p*-aminobenzoyl-L-glutamique (PGA), comme illustré dans la *figure 4* [14].

Design d'un nouvel analogue

Afin de contourner les problèmes de stabilité associés à l'AF, nous avons entrepris la synthèse d'un nouvel analogue, l'AAF (*figure 5*), afin d'offrir une meilleure stabilité chimique tout en conservant une forte affinité pour le récepteur FRα. La conception de cet AAF, en collaboration avec le Laboratoire de Chimie Physique et Moléculaire (Samir Acherar, LCPM, Nancy), a été guidée par des études de modélisation moléculaire et des modifications chimiques rationnelles, visant à éliminer les liens labiles identifiés comme les principaux sites de dégradation de l'AF, tout en maintenant des interactions favorables avec le récepteur.

Ainsi, le cycle *p*-aminobenzoïque de l'AF a été remplacé par un noyau triazole, afin de garder un noyau aromatique et de maintenir les interactions π-π *stacking* avec FRα. Par la suite, l'AAF a été couplé à un PS, la Pyro-a, *via* un bras espaceur PEG, dans le but d'améliorer la solubilité et la biocompatibilité du composé final (*figure 5*). Ce nouveau PS conjugué, nommé Pyro-PEG-AAF ou PS^{AAF}, a ainsi été obtenu après dix étapes de synthèse avec un rendement global de 19 %.

- Effet de la conjugaison sur les propriétés photophysiques du PS^{AAF}

Les propriétés photophysiques de l'AAF ont été comparées à celles de l'AF afin d'évaluer l'impact de la modification de la structure chimique. De même, les propriétés photophysiques de PS^{AAF} ont été comparées à celles de la Pyro-a afin d'étudier l'impact du couplage sur ces propriétés.

Le spectre d'absorption obtenu dans l'éthanol pour l'AAF démontre la conservation des transitions électroniques caractéristiques de l'AF. Les coefficients d'extinction molaire égaux à 7 563 et 4 111 $L{\cdot}mol^{-1}{\cdot}cm^{-1}$ à 278 et 349 nm respectivement

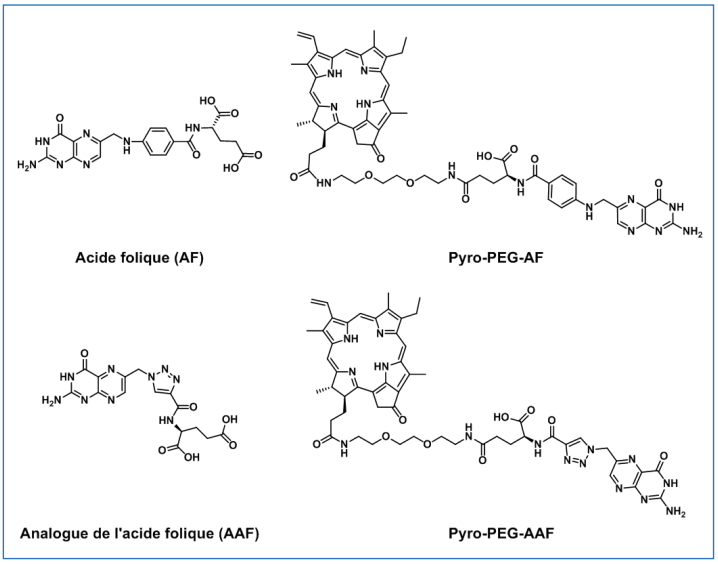


Figure 5 - Structures chimiques de l'acide folique (AF), son analogue (AAF), Pyro-PEG-AF et Pyro-PEG-AAF.

pour l'AAF sont plus faibles que ceux obtenus pour l'AF (16 814 et 5 381 $L{\cdot}mol^{-1}{\cdot}cm^{-1}$ à 278 et 349 nm respectivement). Cette diminution s'explique par une baisse de l'aromaticité, *via* le remplacement du noyau aromatique par un noyau triazole.

Le spectre d'absorption de PS^{AAF} enregistré dans l'éthanol présente les bandes caractéristiques de la Pyro-a, avec une bande de Soret à 410 nm et quatre bandes Q à 506, 536, 608 et 668 nm. Malgré une légère baisse des coefficients d'extinction molaire après conjugaison, PS^{AAF} reste apte à être utilisé en PDT. Les rendements quantiques dans l'éthanol de fluorescence ($\Phi_F = 0{,}32$) et de production de $^1O_2$ ($\Phi_\Delta = 0{,}42$) sont proches de ceux de la Pyro-a seule ($\Phi_F = 0{,}39$ et $\Phi_\Delta = 0{,}53$). Ces résultats démontrent que la conjugaison du PS avec l'AF n'altère pas significativement les propriétés photophysiques du PS (*figure 6*).

- Stabilité photophysique des photosensibilisateurs sous illumination

La stabilité de PS^{AAF} a été évaluée sous exposition lumineuse (668 nm, 10 $mW{\cdot}cm^{-2}$) dans l'éthanol, afin de vérifier notamment le maintien de son émission de fluorescence et de sa production de $^1O_2$ sur une durée totale de 60 minutes. Les deux paramètres sont restés stables dans le temps, avec des valeurs élevées après 60 min ($\Phi_F = 0{,}26$; $\Phi_\Delta = 0{,}36$), indiquant une bonne photostabilité de PS^{AAF}, favorable à la PDT.

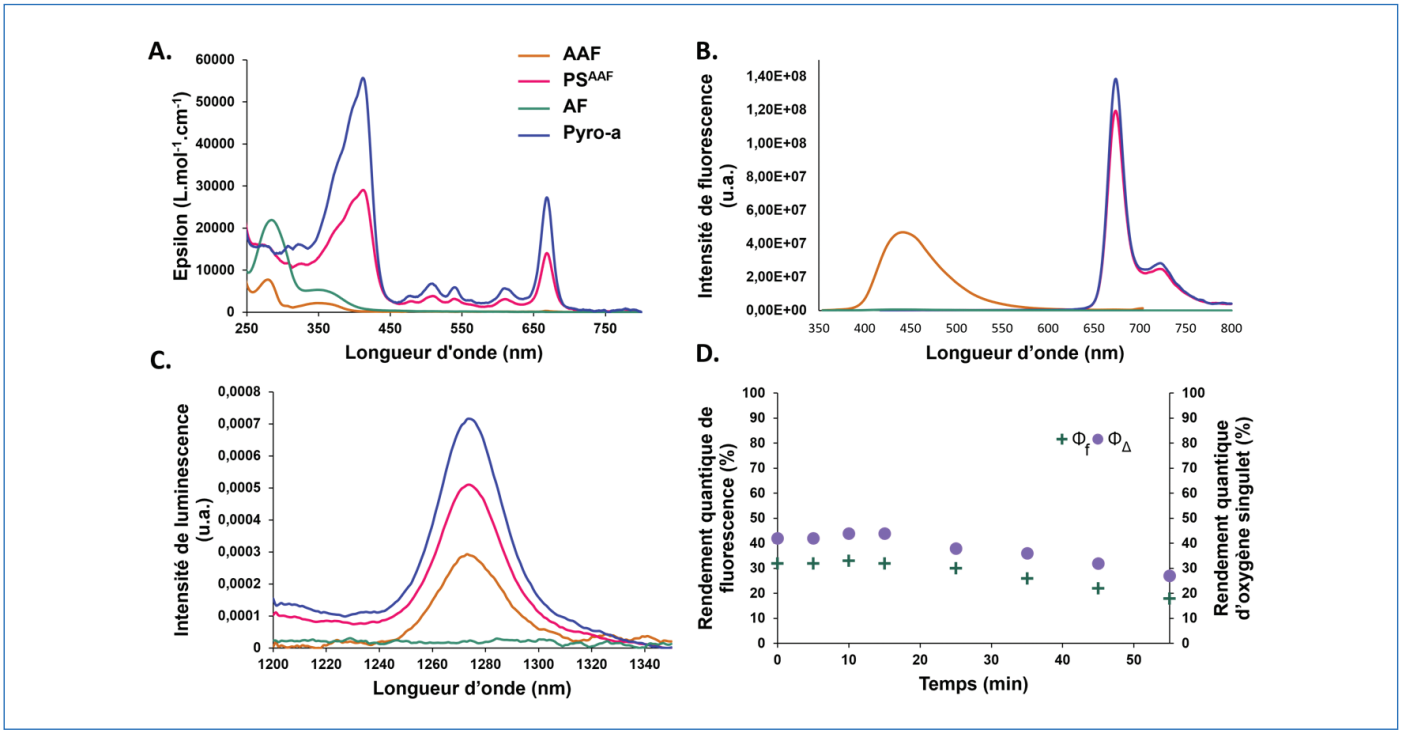


Figure 6 - (A) Spectres d'absorption des différents composés dans l'éthanol ; (B) Spectres d'émission de fluorescence des différents composés dans l'éthanol (λ_{exc} = 668 nm) ; (C) Spectres de luminescence de $^1O_2$ après excitation des différents composés dans l'éthanol (λ_{exc} = 668 nm) ; (D) Étude de l'impact d'une exposition lumineuse sur les rendements quantiques de fluorescence et de $^1O_2$ de PS^{AAF} en fonction du temps (λ_{exc} = 668 nm, 10 mW·cm^{-2}).

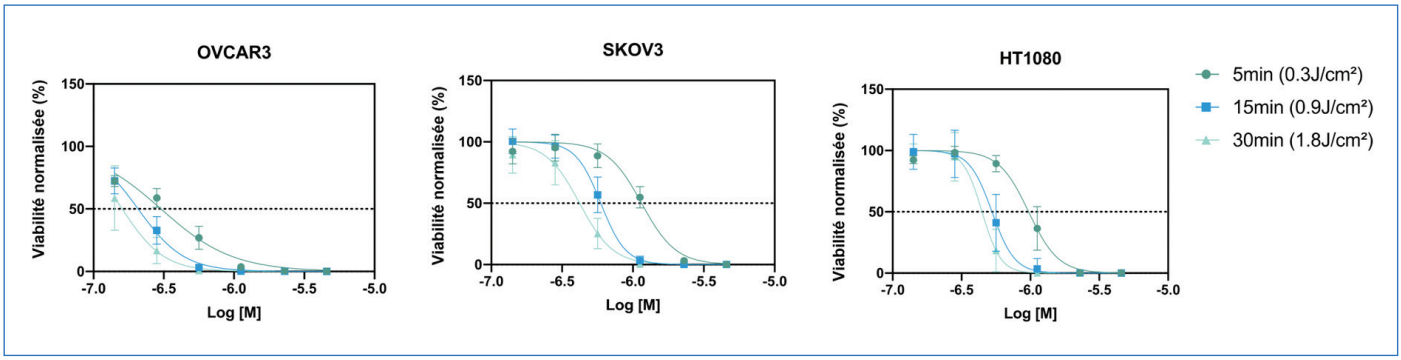


Figure 7 - Effet de la thérapie photodynamique sur la viabilité de différentes lignées cellulaires tumorales.

- *Étude des propriétés biologiques de PS^{AAF}*

Les études biologiques, réalisées en collaboration avec le laboratoire OncoThAI (Nadira Delhem, Unité 1189, INSERM, Université de Lille, CHU), ont été menées sur deux lignées de cellules cancéreuses ovariennes, OVCAR3 et SKOV3, surexprimant FRα, et sur une lignée cellulaire de fibrosarcome, HT1080, sous-exprimant FRα. Les résultats obtenus ont notamment démontré que PS^{AAF} n'est pas cytotoxique en l'absence de lumière, mais qu'il est capable d'induire efficacement la mort des cellules tumorales sous illumination à 668 nm. En effet, la *figure 7* montre comment la survie (viabilité) de ces trois types de cellules cancéreuses diminue en fonction de la concentration de PS^{AAF} utilisée. Trois conditions expérimentales sont comparées : 5 minutes (0,3 J/cm^2), 15 minutes (0,9 J/cm^2) ou 30 minutes d'illumination (1,8 J/cm^2). Plus le temps d'illumination est long et plus la concentration du composé augmente, plus la survie cellulaire diminue.

De plus, il a été démontré que l'utilisation de PS^{AAF} en PDT a un impact sur le système immunitaire. Bien que le traitement PDT avec PS^{AAF} n'induise pas directement l'activation des cellules immunitaires, il est capable d'inhiber l'inflammation médiée par l'IL-6, une cytokine pro-inflammatoire clé dans la progression et l'agressivité tumorale.

Tous ces résultats ont été récemment publiés dans *Journal of Controlled Release* [15].

- *Étude comparative de la stabilité*

Les stabilités de l'AAF et de PS^{AAF} ont été évaluées sous diverses conditions expérimentales, afin d'être directement comparées à celles de l'AF et de Pyro-PEG-AF respectivement. Pour cela, une étude expérimentale prenant en compte six paramètres distincts a été mise en place en collaboration avec l'entreprise CYBERNANO (Thierry Bastogne, Nancy) (*tableau I*). Ces paramètres incluent la lumière, la température, l'oxygène, le pH, le milieu et la forme de stockage du produit (solide ou en solution). Pour l'étude de la stabilité de l'AF et de l'AAF, quatorze conditions expérimentales ont été réalisées en triplicat* pour chacun des composés. En ce qui concerne l'étude de la stabilité de Pyro-PEG-AF et PS^{AAF}, douze expériences ont été réalisées en triplicat* pour chacun des produits.

Après mise en condition des composés, les solutions ont été analysées par chromatographie liquide haute performance

Tableau I - Ensemble des paramètres expérimentaux sélectionnés.

PRODUITS	TEMPÉRATURE
Acide folique (AF) Analogue de l'acide folique (AAF) Pyro-PEG-AF Pyro-PEG-AAF	- 20 °C 4 °C Température ambiante 40 °C
TEMPS	**EXPOSITION À LA LUMIÈRE**
15 minutes 1 heure 24 heures 1 semaine	Oui Non
PRÉSENCE D'OXYGÈNE	**MILIEU**
Oui Non	DMSO MeOH pH = 4 pH = 7 pH = 10 Poudre

(HPLC) analytique, selon des méthodes préalablement adaptées. Pour chacune des conditions, un étalonnage externe a été utilisé afin de déterminer le pourcentage de dégradation de chaque composé.

La photostabilité accrue de l'analogue seul AAF par rapport à l'AF a ainsi pu être mise en évidence. En effet, ce dernier se dégrade complètement après 24 h d'exposition lumineuse dans une solution tampon à pH 7, à température ambiante et en l'absence d'oxygène. En revanche, l'AAF ne subit que 8 % de dégradation, constituant ainsi un candidat plus adapté aux applications cliniques exposées à la lumière.

De plus, dans les trois conditions du plan d'expérience menées à 40 °C, la dégradation de l'AF était environ deux fois plus importante que celle de l'AAF, ce qui suggère que ce dernier est plus stable sous l'effet d'un stress thermique.

L'analyse statistique des 156 expériences réalisées, notamment *via* la méthode de forêt aléatoire, a révélé que la nature chimique du composé est le facteur ayant le plus fort impact sur la stabilité. Il a été démontré que l'AAF est plus stable que l'AF, et que le PS^{AAF} présente une stabilité supérieure à celle du Pyro-PEG-AF.

Ainsi, la meilleure stabilité de l'AAF en fait un candidat prometteur pour la PDT, permettant un maintien efficace de sa fonction thérapeutique dans diverses conditions.

Perspectives

La synthèse d'un nouvel analogue de l'acide folique est en cours afin d'améliorer sa stabilité chimique, tout en conservant une forte affinité pour le récepteur au folate alpha FRα. Sa conception repose sur des études préalables de modélisation moléculaire et s'inscrit dans le développement d'un traitement de photothérapie dynamique visant à induire une réponse immunostimulatrice après traitement. Des études complémentaires seront néanmoins nécessaires afin d'évaluer la stabilité de cet analogue et de ses conjugués dans des conditions prolongées et plus stressantes, ainsi que leur comportement *in vivo*. Cette approche pourrait aboutir à un photosensibilisateur capable d'associer efficacité anticancéreuse ciblée et stimulation de la réponse immunitaire, ouvrant ainsi de nouvelles perspectives pour le traitement des carcinoses péritonéales ovariennes.

Cette étude a bénéficié d'un financement INSERM - Approches interdisciplinaires des processus oncogéniques et perspectives thérapeutiques : apports de la physique, de la chimie et des sciences de l'ingénieur à l'oncologie (PCSI).

* Chacune des conditions expérimentales de stabilité a été réalisée trois fois afin d'obtenir trois valeurs de pourcentage de dégradation pour chaque condition, et ainsi d'évaluer la reproductibilité des résultats obtenus.

[1] F. Bray *et al.*, Global cancer statistics 2022: GLOBOCAN estimates of incidence and mortality worldwide for 36 cancers in 185 countries, *CA Cancer J. Clin.*, **2024**, *74*, p. 229-63, https://doi.org/10.3322/caac.21834

[2] M. Sideris, U. Menon, R. Manchanda, Screening and prevention of ovarian cancer, *Med. J. Aust.*, **2024**, *220*, p. 264-74, https://doi.org/10.5694/mja2.52227

[3] T. Al Rawahi *et al.*, Surgical cytoreduction for recurrent epithelial ovarian cancer, *Cochrane Database Syst. Rev.*, **2013**, CD008765, https://doi.org/10.1002/14651858.CD008765.pub3

[4] P. Varaganti, V. Buddolla, B. A. Lakshmi, Y.-J. Kim, Recent advances in using folate receptor 1 (FOLR1) for cancer diagnosis and treatment, with an emphasis on cancers that affect women, *Life Sci.*, **2023**, *326*, 121802, https://doi.org/10.1016/j.lfs.2023.121802

[5] A. M. Martínez, M. Benito, E. Pérez, M. D. Blanco, Chap. 13 - Recent advances of folate-targeted anticancer therapies and diagnostics: current status and future prospectives, in *Nanostructures for Cancer Therapy*, Elsevier, **2017**, p. 329-50, https://doi.org/10.1016/B978-0-323-46144-3.00013-1

[6] K. R. Kalli *et al.*, Folate receptor alpha as a tumor target in epithelial ovarian cancer, *Gynecol. Oncol.*, **2008**, *108*, p. 619-26, https://doi.org/10.1016/j.ygyno.2007.11.020

[7] N. Robinson, P. Grabowski, I. Rehman, Alzheimer's disease pathogenesis: is there a role for folate?, *Mech. Ageing Dev.*, **2018**, *174*, p. 86-94, https://doi.org/10.1016/j.mad.2017.10.001

[8] Y. Lee, K. H. Vousden, M. Hennequart, Cycling back to folate metabolism in cancer, *Nat. Cancer*, **2024**, *5*, p. 701-15, https://doi.org/10.1038/s43018-024-00739-8

[9] R. Schneider *et al.*, Design, synthesis, and biological evaluation of folic acid targeted tetraphenylporphyrin as novel photosensitizers for selective photodynamic therapy, *Bioorg. Med. Chem.*, **2005**, *13*, p. 2799-808, https://doi.org/10.1016/j.bmc.2005.02.025

[10] J. Gravier *et al.*, Improvement of *meta*-tetra(hydroxyphenyl)chlorin-like photosensitizer selectivity with folate-based targeted delivery: synthesis and in vivo delivery studies, *J. Med. Chem.*, **2008**, *51*, p. 3867-77, https://doi.org/10.1021/jm800125a

[11] A. Stallivieri *et al.*, Folic acid conjugates with photosensitizers for cancer targeting in photodynamic therapy: synthesis and photophysical properties, *Bioorg. Med. Chem.*, **2017**, *25*, p. 1-10, https://doi.org/10.1016/j.bmc.2016.10.004

[12] H. Azais *et al.*, Conjugué de pyrophéophorbide et son utilisation dans le traitement du cancer et comme marqueur fluorescent, *WO Patent*, **2019**, WO 2019/016397, 24/01/2019.

[13] A. M. Gazzali *et al.*, Stability of folic acid under several parameters, *Eur. J. Pharm. Sci.*, **2016**, *93*, p. 419-30, https://doi.org/10.1016/j.ejps.2016.08.045

[14] O. H. Lowry, O. A. Bessey, E. J. Crawford, Photolytic and enzymatic transformations of pteroylglutamic acid, *J. Biol. Chem.*, **1949**, *180*, p. 389-98, https://doi.org/10.1016/S0021-9258(18)56755-7

[15] M. Moinard *et al.*, Targeted photodynamic therapy using a vectorized photosensitizer coupled to folic acid analog induces ovarian tumor cell death and inhibits IL-6-mediated inflammation, *J. Control. Release*, **2024**, *371*, p. 351-70, https://doi.org/10.1016/j.jconrel.2024.05.033

Morgane MOINARD, postdoctorante au sein du Laboratoire Réactions et Génie des Procédés (LRGP, UMR 7274 CNRS-Université de Lorraine) à Nancy, a reçu le ***Prix de thèse 2025 de la SP2P (subdivision Photochimie, photophysique et photosciences de la division Chimie Physique de la Société Chimique de France)***.



Le supersilane, l'abstracteur d'atomes d'halogène privilégié en photochimie

Lilian GENILLER[1], **Florian JAROSCHIK**[2] **et Alexis PRIETO**[2]

[1] Université de Padoue (Italie).
[2] Institut Charles Gerhardt - UMR 5253, Pôle Chimie Balard Recherche, Montpellier.
✉ lilian.geniller@gmail.com ; florian.jaroschik@enscm.fr ; alexis.prieto@enscm.fr

Résumé La recherche de transformations plus économiques et respectueuses de l'environnement en chimie organique a récemment stimulé le développement de la photocatalyse sous lumière visible. Dans ce domaine de recherche en pleine expansion, les halogénures organiques, abondants et facilement disponibles, sont souvent utilisés comme précurseurs de radicaux. Pour générer les radicaux organiques correspondants dans des conditions réactionnelles douces, les processus de transfert d'atome d'halogène (XAT) jouent un rôle important et nécessitent des agents XAT appropriés. Le supersilane est largement employé comme agent XAT efficace sous activation par la lumière visible, permettant une large gamme de réactions de formation de liaisons C–C. Cet article met en lumière de nouvelles applications du supersilane à travers trois exemples concernant la chimie métallaphotoredox, les hydrohalogénations et les réactions de trifluoropropanation sous conditions catalytiques.

Mots-clés **Photochimie, radicaux, transfert d'atome d'halogène, silanes, lumière, catalyse.**

Abstract **Supersilane, the preferred halogen atom abstractor in photochemistry**
The quest for more economic and environmentally friendly transformations in organic chemistry has recently fuelled the development of visible-light photocatalysis. In this rapidly growing research field, abundant and readily available organic halides are often used as radical precursors. For generating the corresponding organic radicals under mild reaction conditions, halogen atom transfer (XAT) processes play an important role and suitable XAT agents are required. Supersilane has been widely employed as an efficient XAT agent under visible light activation enabling a large array of C–C bond formation reactions. In this short review, new applications of supersilane will be highlighted via three examples concerning metallaphotoredox chemistry, hydrohalogenations and trifluoropropanation reactions under catalytic conditions.

Keywords **Photochemistry, radicals, halogen atom transfer, silanes, light, catalysis.**

https://doi.org/10.63133/scf.act-chim.2026.520.05

La photochimie, une révolution douce pour une chimie organique durable

La chimie organique, discipline dédiée à l'étude et à la transformation des molécules à base de carbone, a grandement marqué notre monde contemporain. Elle est à l'origine de nombreuses innovations utilisées au quotidien dans nos sociétés comme les médicaments, les arômes alimentaires et les parfums ainsi que les matériaux polymères. Pourtant, elle doit aujourd'hui relever des défis majeurs, tels que réduire son empreinte environnementale, développer des procédés plus directs et sélectifs en vue d'optimiser l'efficacité des synthèses. C'est dans ce contexte que la photochimie et la photocatalyse ont émergé comme des stratégies prometteuses apportant des solutions tangibles aux problématiques précédemment évoquées. En effet, ces approches exploitent l'énergie lumineuse, une ressource abondante et renouvelable, et permettent de réaliser la synthèse de molécules organiques en conditions douces. Ces conditions réactionnelles permettent notamment d'isoler des molécules complexes difficilement accessibles *via* les voies de synthèse traditionnelles (*figure 1*). L'autre atout majeur de la photochimie réside dans sa capacité à activer des composés stables et souvent inertes en chimie thermique, tels que les acides carboxyliques, les alcools, et à les convertir en intermédiaires réactionnels hautement réactifs appelés espèces radicalaires. Quatre grands mécanismes permettent la génération de radicaux : les transferts d'atome d'halogène (XAT) [1], les transferts d'atome d'hydrogène (HAT) [2], les transferts monoélectroniques (SET) [3] et les transferts d'énergies (EnT) [4] (*figure 1*). Dans ce cadre-là, nous nous sommes plus particulièrement intéressés à l'étude et à la mise en place de nouveaux protocoles photoinduits permettant la valorisation d'halogénures d'alkyles (R–X) par transferts d'atome d'halogène (XAT).

XAT, l'outil clé pour activer les halogénures organiques sous activation lumineuse

Les halogénures organiques sont des composés importants en chimie organique, utilisés dans des nombreuses transformations synthétiques comme produits de départ. Sous conditions photochimiques, ils peuvent être activés de plusieurs manières afin de générer les radicaux carbonés correspondants. L'activation des halogénures organiques pour la formation d'espèces radicalaires peut se faire soit par transfert monoélectronique (SET), soit par transfert d'atome d'halogène (XAT). Cependant, les processus SET, régis par les potentiels redox des molécules, sont difficiles à mettre en œuvre avec les halogénures organiques. En effet, ces composés, difficilement réductibles, ne sont pas de bons candidats dans les processus

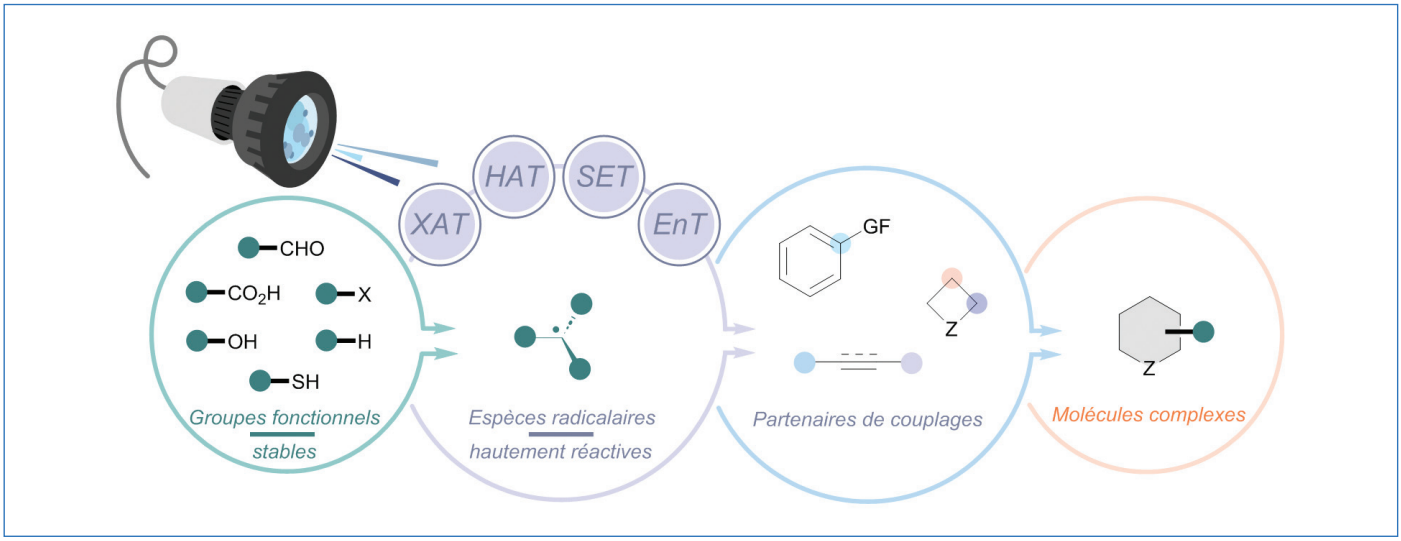


Figure 1 - Vue schématique des processus photo-induits.

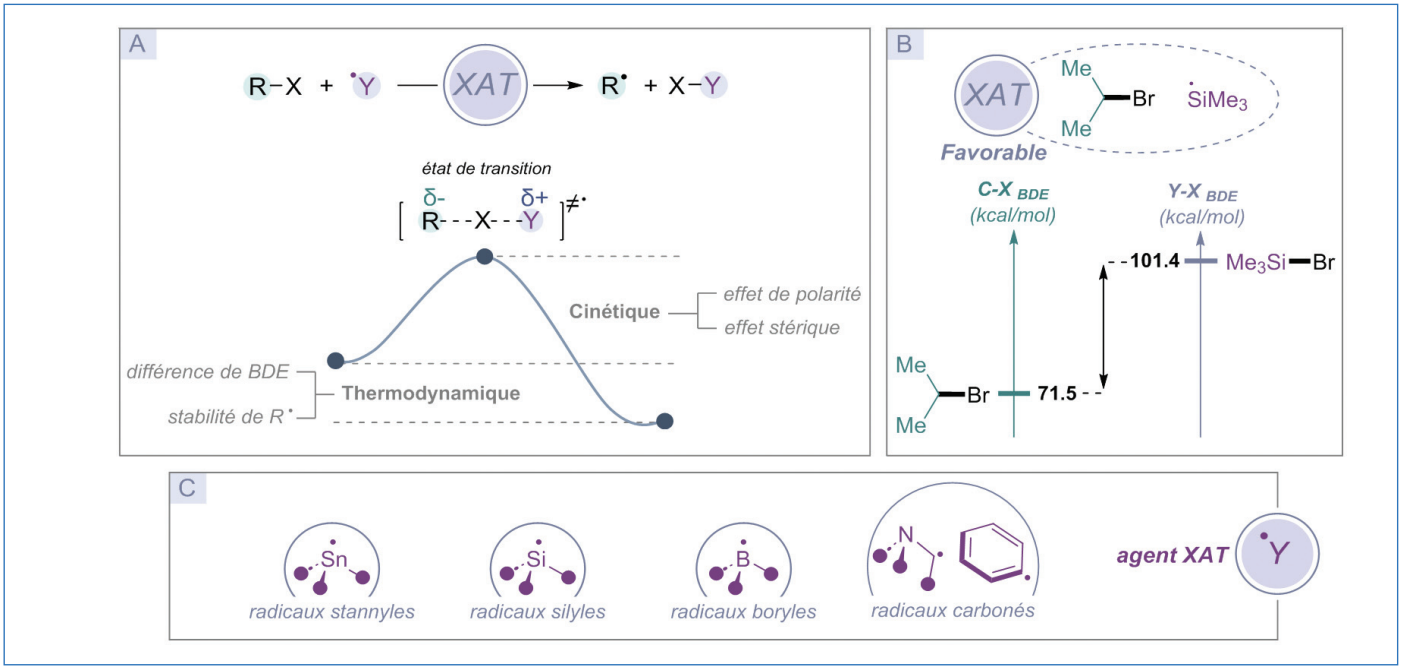


Figure 2 - Vue d'ensemble des transferts d'atomes d'halogène (XAT).

Glossaire

4CzIPN : 1,2,3,5-tetrakis(carbazol-9-yl)-4,6-dicyanobenzène
BDE : énergie de dissociation de liaison (« *bond dissociation energy* »)
BTP : 2-bromo-3,3,3-trifluoro-1-propène
DBE : dibromoéthane
EnT : transfert d'énergie (« *energy transfer* »)
HAT : transfert d'atome d'hydrogène (« *hydrogen atom transfer* »)
SET : transfert monoélectronique (« *single electron transfer* »)
TTMSS : supersilane, tris(triméthylsilyl)silane
XAT : transfert d'atome d'halogène (« *halogen atom transfer* »)

de type SET. Les XAT, quant à eux, sont gouvernés par les énergies de dissociation de liaison (BDE), faisant de ces derniers un mode d'activation privilégiée pour la génération de radicaux carbonés à partir d'halogénures organiques. D'un point de vue mécanistique, ces réactions de substitution homolytique bimoléculaire (S_H2) permettent la génération d'un radical $R^\bullet$ *via* la rupture homolytique d'une liaison R–X (halogénures organiques) par l'emploi d'une espèce radicalaire $Y^\bullet$, communément appelée promoteur de XAT ou agent XAT (*figure 2A*). Ces processus présentent un profil énergétique simple en une étape avec un état de transition d'arrangement colinéaire des groupes d'attaque Y et de départ R. Plusieurs aspects cinétiques et thermodynamiques vont impacter la sélectivité et la faisabilité de ces processus radicalaires.

Aspects cinétiques

Les aspects cinétiques dépendent principalement d'effets stériques et de polarité. En effet, les positions peu accessibles ($C_{encombré}$–X) peuvent se voir défavorisées vis-à-vis de positions spatialement moins contraintes ($C_{accessible}$–X). La polarité des espèces engagées dans les XAT a également une influence considérable, car elle permet ou non la stabilisation de l'état de transition. En effet, lors de l'alignement colinéaire dû à l'attaque de $Y^\bullet$ et au départ de $R^\bullet$ autour de l'atome transféré, des charges partielles se forment. Ainsi, les XAT sont favorisés lorsque le groupement R permet la stabilisation d'une charge négative et que le groupement Y stabilise une charge

positive. De ce fait, les XAT sont très rapides lorsque les agent XAT ($Y^{\bullet}$) ont un caractère nucléophile et les halogénures organiques ont un caractère électrophile (portant des groupements électroattracteurs (GEA), exemple GEA–R–X) (*figure 2A*). À l'inverse, les XAT sont défavorisés lorsque les halogénures organiques utilisés présentent un caractère nucléophile (portant des groupements électrodonneurs (GED), exemple GED–R–X).

Aspects thermodynamiques

La thermodynamique des XAT est régie par des effets enthalpiques : afin que ces transferts soient exergoniques, la liaison formée X–Y doit être plus forte que la liaison rompue C–X, se traduisant par la simple inégalité $BDE_{X-Y} > BDE_{C-X}$ (*figure 2B*). La stabilité du radical formé $R^{\bullet}$ est également importante d'un point de vue thermodynamique.

XAT à base de supersilane en photocatalyse

La nature de l'agent XAT est cruciale dans les réactions de synthèse organique, car elle impacte fortement ses paramètres cinétiques et thermodynamiques, et donc sa réactivité. Au fil du temps, certaines espèces se sont imposées comme d'excellents candidats pour ces réactions de transfert, notamment les radicaux stannyles et silyles. Plus récemment, les radicaux boryles et carbonés, tels que les radicaux α-aminés ou aryles, ont également émergé comme des acteurs majeurs, malgré une réactivité plus limitée (*figure 2C*). Le mode d'activation de ces promoteurs joue également un rôle important dans la conception des transformations organiques et a évolué au fil des disciplines et des avancées technologiques. Historiquement, les premiers exemples ont été rapportés avec les radicaux stannyles, utilisés dans des conditions thermiques ou sous irradiation UV pour des réactions de déshalogénation ou d'addition sur des composés insaturés. Cependant, en raison de leur toxicité, ces radicaux stannyles ont progressivement cédé leur place aux radicaux silyles. Parmi eux, le supersilane (tris(triméthylsilyl)silane ou TTMSS, *figure 3A*) s'est distingué des autres espèces [5] et s'est montré particulièrement compatible avec les méthodologies photocatalysées. En effet, en plus d'être activable par transfert d'atome d'hydrogène (HAT, réaction analogue au XAT), conventionnellement utilisé dans des conditions thermiques, son potentiel redox lui permet également d'être activé par oxydation monoélectronique (SET_{ox}) à l'aide d'un photocatalyseur (*figure 3B*).

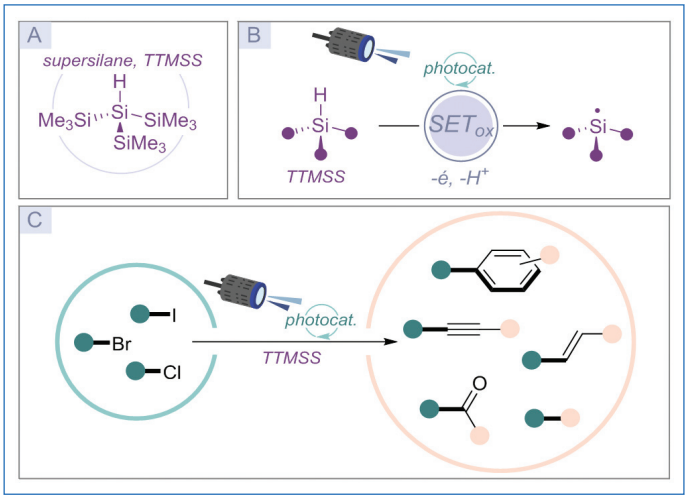


Figure 3 - Le supersilane en photocatalyse.

Ces propriétés ont élargi le champ d'application des XAT, permettant la mise en place de conditions réactionnelles plus douces et mieux contrôlées, dans lesquelles de nombreux halogénures ont été valorisés au sein de transformations plus complexes.
Des modifications structurelles récentes du supersilane ont même permis de développer des agents XAT aux propriétés plus spécifiques, comme le supersilanol, présentant un caractère hydrure moins prononcé, ou encore l'aminosupersilane, permettant l'utilisation d'halogénures beaucoup moins activés tels que les chlorures d'alkyle.
Le supersilane représente donc un outil de choix pour la valorisation des halogénures organiques et leur emploi pour la synthèse de molécules complexes par formation de nouvelles liaisons carbone–carbone, notamment dans des transformations photocatalytiques (*figure 3C*) [1]. C'est pour ces raisons qu'il se trouve au cœur des stratégies réactionnelles récemment développées.

XAT et métallaphotoredox pour un couplage croisé désulfurisant

L'association de la catalyse organométallique et de la photocatalyse a conduit au développement d'un outil particulièrement puissant, la métallaphotoredox. Cette stratégie repose sur l'utilisation de la lumière visible pour générer des radicaux, lesquels sont directement engagés dans des réactions de couplage métallo-catalysé avec divers partenaires [6]. Parmi les métaux disponibles, le nickel a été retenu, car il était celui pour lequel les connaissances mécanistiques étaient les plus approfondies au moment du développement de ces travaux. De plus, contrairement à de nombreux précurseurs radicalaires abondants ou commercialement accessibles – tels que les acides carboxyliques, les alcools, les alcanes, les amines ou encore les halogénures organiques –, les thiols n'avaient jusqu'alors jamais été exploités dans ce contexte (*figure 4*). L'objectif de ces travaux a donc été d'intégrer les dérivés thiolés, très présents dans la nature, notamment dans l'acide aminé cystéine, en tant que précurseurs de radicaux dans des réactions de couplage métallaphotocatalysées. Le défi consistait à générer efficacement un radical carboné à partir d'un dérivé soufré, puis à l'insérer dans un cycle catalytique au nickel compatible avec la catalyse photoredox.

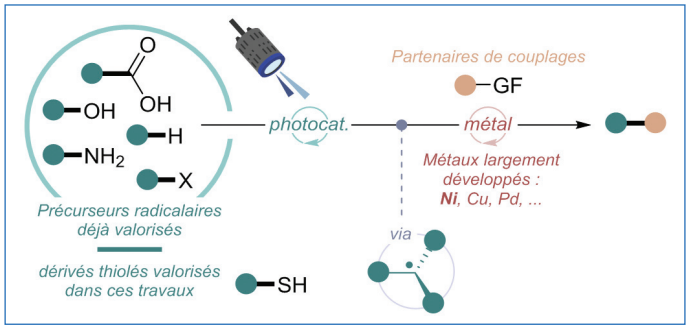


Figure 4 - Aperçu général de la métallaphotoredox.

Plusieurs stratégies permettent, sous irradiation lumineuse, d'obtenir des radicaux carbonés par désulfurisation de dérivés thiolés [7]. Les méthodes les plus courantes reposent sur l'utilisation de thioéthers redox-actifs ou de sels de sulfonium. Cependant, ces systèmes sont généralement activés par réduction monoélectronique (SET_{red}). Or, dans une approche de double catalyse photoredox/nickel, le bon fonctionnement

du cycle catalytique impose une activation oxydante (SET_{ox}) du dérivé soufré, nécessaire pour permettre par la suite la régénération de l'espèce catalytique Ni(0). Cette incompatibilité redox rend ces stratégies difficilement transposables à notre système (*figure 5A*).

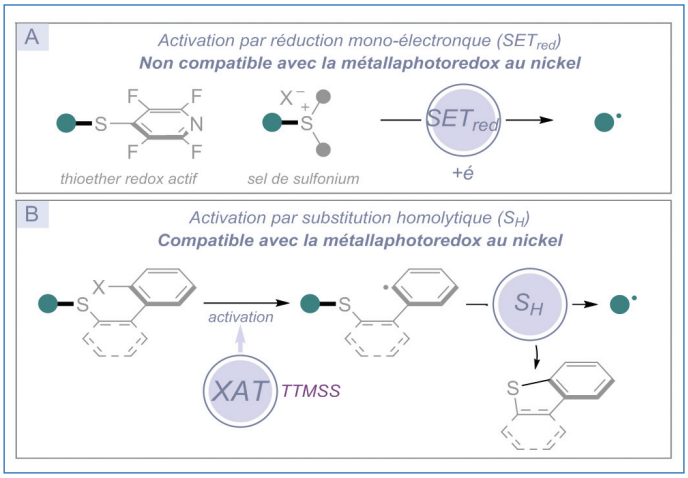


Figure 5 - Processus de désulfurisation radicalaire photo-médiés.

Une autre alternative consiste à employer des thioéthers spécifiquement conçus pour subir, après une première activation radicalaire, un réarrangement intramoléculaire par substitution homolytique (S_H), conduisant au radical carboné escompté (*figure 5B*). Dans le cadre de ces travaux, l'activation retenue repose sur un XAT médié par l'espèce radicalaire issue du supersilane, elle-même générée par SET_{ox}. Cette voie d'activation s'avère compatible avec la stratégie de catalyse au nickel et permet d'inscrire efficacement la désulfurisation dans un cycle métallaphotoredox cohérent.

Après optimisation, les meilleures conditions réactionnelles ainsi que la structure optimale du thioéther ont été déterminées. L'ensemble du processus se déroule à température ambiante, sous lumière bleue, en présence d'un photocatalyseur organique (4CzIPN), d'une base (pyridine) et de faibles quantités de nickel et de ligand (*figure 6*) [8]. La méthodologie développée permet d'accéder à une large gamme de diarylméthanes dissymétriques avec une excellente tolérance vis-à-vis de nombreux groupements fonctionnels. Bien que l'utilisation de dérivés soufrés aliphatiques ne se soit pas avérée efficace, l'engagement direct de structures complexes dans la réaction, telles que des dérivés de stéroïdes (estrone), de sucres (D-glucose), d'acides aminés (L-valine) ou de principes actifs (fluoxétine : la substance active contenue dans le Prozac®), témoigne de la robustesse du protocole et permet d'envisager son application à des fonctionnalisations tardives en fin de synthèse.

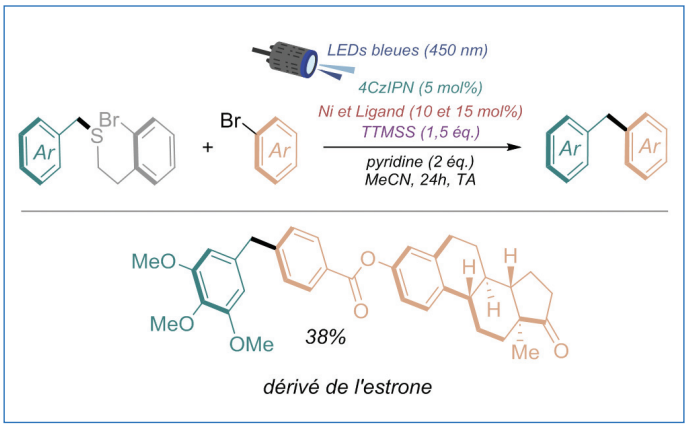


Figure 6 - Couplage désulfurisant en double catalyse photoredox/nickel.

XAT inconventionnel : formation de radicaux halogénés pour l'hydrohalogénation d'alcènes et d'alcynes

La très grande majorité des transformations à base de XAT vise à créer un radical carboné transitoire structurellement stable (qui ne se réarrange pas) pouvant ensuite réagir avec des récepteurs de radicaux. En revanche, dans cette partie, il sera démontré que l'utilisation d'un dihalogénure d'éthane, tel que le dibromoéthane (DBE), permet d'accéder, après XAT, à des radicaux carbonés structurellement instables, qui subissent une β-élimination d'un radical d'halogène et conduisent à la formation d'éthylène gazeux, dont la libération constitue la force motrice du processus (*figure 7*).

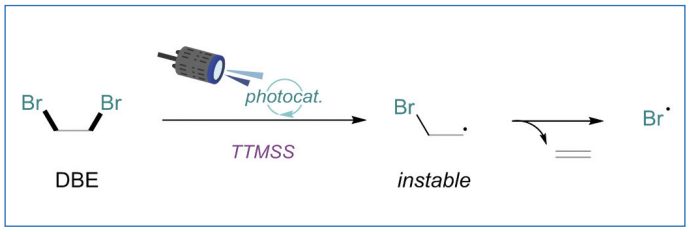


Figure 7 - Génération d'un radical bromé par XAT et élimination d'éthylène.

Cette réactivité a été exploitée dans l'hydrobromation et l'hydroiodation radicalaire de nombreux alcènes et alcynes [9]. Contrairement aux méthodes traditionnelles d'hydrohalogénation radicalaire, qui utilisent des halogénures d'hydrogène en combinaison avec des initiateurs de radicaux, cette nouvelle approche évite les acides forts qui peuvent diminuer la régiosélectivité et être incompatibles avec certains groupements fonctionnels [10]. La réaction du DBE sous lumière bleue, en présence de TTMSS et de divers alcènes, a fourni, après 18 h à température ambiante, une large gamme de produits bromés avec d'excellentes régiosélectivités « anti-Markovnikov ». Pour les alcènes du type accepteur de Michael, de nombreux groupements fonctionnels sont compatibles, comme montré dans l'exemple d'un dipeptide sur la *figure 8*.

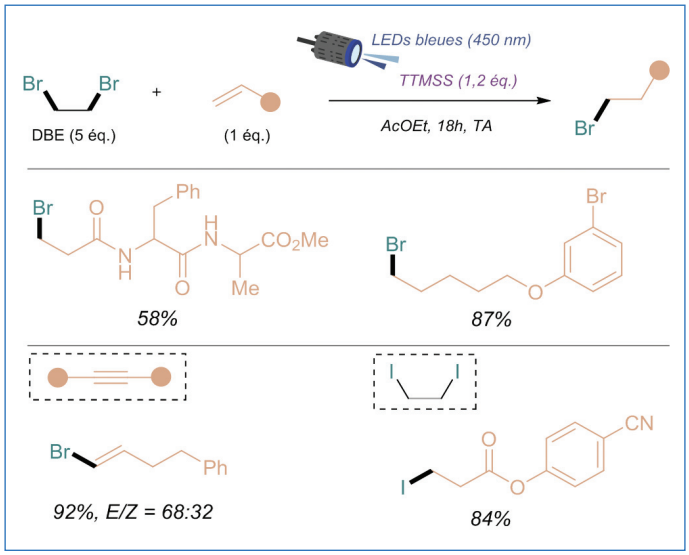


Figure 8 - Hydrohalogénation radicalaire d'alcènes et d'alcynes.

Dans le cas d'alcènes non activés, l'ajout d'un photocatalyseur ou l'utilisation de DBE comme solvant a été nécessaire pour obtenir les produits avec de bons rendements. Les réactions conditionnelles ont également été appliquées avec succès aux alcynes terminaux et internes, menant dans la plupart des cas à des mélanges E/Z des alcènes bromés (*figure 8*). Enfin, changer le DBE pour le diiodoéthane (DIE) a fourni plusieurs produits monoiodés avec de bons rendements et toujours une excellente régiosélectivité (*figure 8*). Sous les conditions établies, l'utilisation de précurseurs halogénés, tels que le 1-bromo-2-chloroéthane ou l'hexachloroéthane, pour former un radical chloré, n'a pas encore permis de réaliser des réactions d'hydrochloration.

XAT avec un système catalytique supersilane/$NaBH_4$ pour la trifluoropropanation formelle d'halogénures organiques

Les procédés synthétiques impliquant un XAT sous lumière visible permettent d'accéder à une large gamme de molécules organiques sous conditions douces. Néanmoins, un désavantage majeur réside dans l'utilisation (super-)stœchiométrique d'un agent XAT, ce qui augmente les coûts et peut causer des problèmes de purification. Il est par conséquent désirable de développer des procédés catalytiques en agent XAT, ce qui est possible, dans certains cas, par l'ajout d'un réducteur sacrificiel peu coûteux, qui n'intervient pas dans la réaction radicalaire. Un rare exemple d'un système catalytique TTMSS/$NaBH_4$ a été décrit en 1989 [11], qui a servi d'inspiration pour développer la trifluoropropanation formelle de divers halogénures organiques décrite ci-dessous. Dans ce processus, le TTMSS aura deux rôles (*figure 9*) : dans un premier temps, le TTMSS$^{\bullet}$ radical (formation : voir *figure 3B* p. 30) réalise un XAT pour générer une espèce radicalaire, ce qui conduit simultanément à la formation du TTMSS–X. Ce dernier est ensuite réduit par du $NaBH_4$ pour rétablir le silane TTMSS–H, qui peut maintenant servir comme donneur d'hydrogène dans des processus de HAT pour terminer une réaction radicalaire et régénérer un nouveau TTMSS$^{\bullet}$ radical. Ainsi, une quantité catalytique de TTMSS est suffisante et les sous-produits sont facilement séparables.

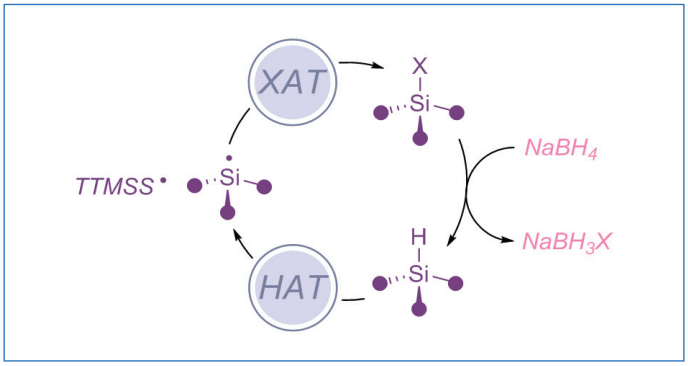


Figure 9 - Processus impliqués dans le système catalytique TTMSS/$NaBH_4$.

Des composés organiques incorporant un ou plusieurs atomes de fluor sont très recherchés, notamment en chimie médicinale et en sciences des matériaux, car les atomes de fluor peuvent modifier de manière significative certains paramètres chimiques, physiques ou biologiques, tels que la réactivité, la solubilité ou la lipophilie [12]. Parmi les fonctions fluorées disponibles, le groupement trifluorométhyle (–CF_3)

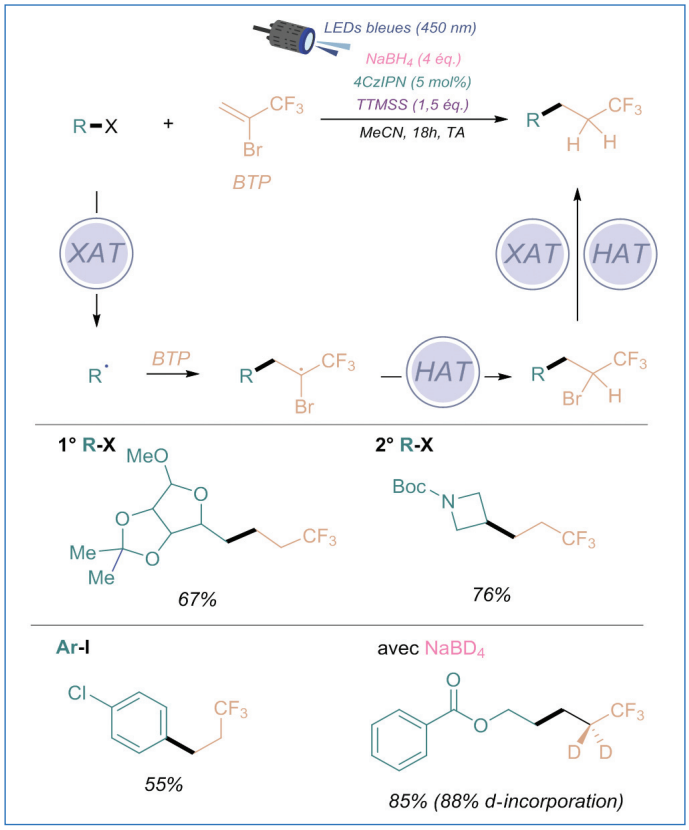


Figure 10 - Trifluoropropanation formelle de divers halogénures organiques. *d*-incorporation : incorporation du deutérium dans la molécule.

se distingue par son intégration dans de nombreux principes actifs commerciaux tels que la fluoxétine et l'alpélisib. Cela a suscité un intérêt croissant pour le développement de méthodologies permettant son incorporation, en particulier par voie photochimique [13]. Pour ce faire, un large panel de sources de groupement –CF_3 amplement développé (réactif d'Umemoto, Ruppert-Prakash, Langlois…) avait déjà été utilisé pour obtenir des fonctions trifluorométhyles. Notre stratégie novatrice a visé l'introduction d'un motif trifluoropropane (–CH_2–CH_2–CF_3) sur des halogénures organiques à partir d'un produit peu onéreux, largement disponible dans le commerce et facile à manipuler au laboratoire : le 2-bromo-3,3,3-trifluoro-1-propène (BTP) (*figure 10*) [14]. Celui-ci sert d'accepteur de radicaux carbonés, formés par XAT à partir du supersilane activé et de l'halogénure organique. Cette étape conduit à la génération d'une nouvelle espèce radicalaire intermédiaire, qui est ensuite impliquée dans un HAT avec le supersilane, formant ainsi un intermédiaire bromé et régénérant l'agent XAT. Un deuxième enchaînement de XAT-HAT successif permet finalement la réduction de cet intermédiaire, conduisant au produit final souhaité. Cette procédure est compatible avec des halogénures d'alkyle primaires et secondaires, ainsi qu'avec des iodures d'aryles et de nombreux groupements fonctionnels. Pour quelques rares substrats portant des insaturations (alcènes, alcynes), le système catalytique ne s'est pas avéré adéquat, mais les produits trifluoropropanes ont été obtenus en utilisant des quantités stœchiométriques de TTMSS. Enfin, en remplaçant le $NaBH_4$ dans le système catalytique par du $NaBD_4$, il a été possible d'obtenir une série de composés bis-deutérés avec de très bons taux d'incorporation de deutérium. Ceci est un exemple rare d'une double deutération alpha d'un groupement –CF_3, qui en même temps confirme la proposition mécanistique de la réaction.

Perspectives

Les trois exemples d'utilisation du supersilane dans des XAT sous lumière bleue illustrent des nouvelles applications en termes de substrats de départ, de sélectivité, de nouvelles fonctionnalités et d'efficacité. Ils ouvrent un large champ à la diversification et à l'exploration de l'espace chimique, dans un souci de rendre les procédés plus économes et d'utiliser des produits facilement accessibles, notamment biosourcés.

[1] F. Juliá, T. Constantin, D. Leonori, Applications of halogen-atom transfer (XAT) for the generation of carbon radicals in synthetic photochemistry and photocatalysis, *Chem. Rev.*, **2022**, *122*, p. 2292-352, https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.1c00558

[2] L. Capaldo, D. Ravelli, M. Fagnoni, Direct photocatalyzed hydrogen atom transfer (HAT) for aliphatic C–H bonds elaboration, *Chem. Rev.*, **2022**, *122*, p. 1875-924, https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.1c00263

[3] M. H. Shaw, J. Twilton, D. W. C. MacMillan, Photoredox catalysis in organic chemistry, *J. Org. Chem.*, **2016**, *81*, p. 6898-926, https://doi.org/10.1021/acs.joc.6b01449

[4] S. Dutta, J. E. Erchinger, F. Strieth-Kalthoff, R. Kleinmans, F. Glorius, Energy transfer photocatalysis: exciting modes of reactivity, *Chem. Soc. Rev.*, **2024**, *53*, p. 1068-89, https://doi.org/10.1039/d3cs00190c

[5] C. Chatgilialoglu, C. Ferreri, Y. Landais, V. I. Timokhin, Thirty years of $(TMS)_3SiH$: a milestone in radical-based synthetic chemistry, *Chem. Rev.*, **2018**, *118*, p. 6516-72, https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.8b00109

[6] J. Twilton *et al.*, The merger of transition metal and photocatalysis, *Nat. Rev. Chem.*, **2017**, *1*, 0052, https://doi.org/10.1038/s41570-017-0052

[7] L. Geniller, M. Taillefer, F. Jaroschik, A. Prieto, Photo-induced desulfurative processes for carbon radical generation, *ChemCatChem* **2023**, *15*, e202300808, https://doi.org/10.1002/cctc.202300808

[8] L. Geniller, M. Taillefer, F. Jaroschik, A. Prieto, Nickel metallaphotoredox catalysis enabling desulfurative cross coupling reactions, *Adv. Synth. Catal.*, **2022**, *364*, p. 4249-54, https://doi.org/10.1002/adsc.202201152

[9] L. Geniller, M. Taillefer, F. Jaroschik, A. Prieto, Photo-induced halogen-atom transfer: generation of halide radicals for selective hydrohalogenation reactions, *Chem. Eur. J.*, **2022**, *28*, e202201495, https://doi.org/10.1002/chem.202201495

[10] M. Galli, C. J. Fletcher, M. del Pozo, S. M. Goldup, Scalable anti-Markovnikov hydrobromination of aliphatic and aromatic olefins, *Org. Biomol. Chem.*, **2016**, *14*, p. 5622-6, https://doi.org/10.1039/C6OB00692B

[11] M. Lesage, C. Chatgilialoglu, D. Griller, Tris(trimethylsilyl)silane: a catalyst for radical mediated reduction reactions, *Tetrahedron Lett.*, **1989**, *30*, p. 2733-4, https://doi.org/10.1016/S0040-4039(00)99111-1

[12] D. O'Hagan, Understanding organofluorine chemistry. An introduction to the C–F bond, *Chem. Soc. Rev.*, **2008**, *37*, p. 308-19, https://doi.org/10.1039/b711844a

[13] X. Pan, H. Xia, J. Wu, Recent advances in photoinduced trifluoromethylation and difluoroalkylation, *Org. Chem. Front.*, **2016**, *3*, p. 1163-85, https://doi.org/10.1039/c6qo00153j

[14] L. Geniller, M. Taillefer, F. Jaroschik, A. Prieto, Photo-induced formal trifluoropropanation of organic halides, *ACS Catal.*, **2023**, *13*, p. 8624-30, https://doi.org/10.1021/acscatal.3c02087

Actuellement postdoctorant dans l'équipe du Pr. Luca Dell'Amico à l'Université de Padoue (Italie), **Lilian GENILLER** a obtenu son doctorat à l'Université de Montpellier en 2024 et il a reçu le ***Prix de thèse Dina Surdin 2025 de la division Chimie Organique (DCO) de la Société Chimique de France***.



Chimie et...Étymologie

D'après les chroniques de Pierre Avenas !

Après *La Prodigieuse histoire du nom des éléments*, voici

La Foisonnante histoire du nom des molécules

Cet ouvrage richement illustré révèle l'étymologie des noms des molécules, qui deviennent ainsi le point de départ d'un périple bien au-delà de la chimie, nous entraînant vers la botanique, la zoologie, l'histoire, la mythologie, la médecine, la biologie, les techniques ou encore l'industrie…



22 € - 270 pages

Existe en format ebook

www.laboutique.edpsciences.fr

La vitamine B1 et les carbènes *N*-hétérocycliques

Inspiration ou invention ?

Ludivine DELFAU, Eder TOMÁS-MENDIVIL et David MARTIN

Département de Chimie Moléculaire de Grenoble (DCM, UMR 5250, CNRS-Université Grenoble Alpes).
✉ david.martin@univ-grenoble-alpes.fr

Résumé Le récit de l'avènement des carbènes *N*-hétérocycliques en tant qu'outils performants pour la catalyse moderne possède deux facettes contradictoires, du moins en apparence. En effet, leur introduction au sein de catalyseurs organométalliques est le fruit d'une longue mise au point de la chimie moléculaire de synthèse, s'étendant des années 1960 à nos jours. Par contre, leur utilisation en tant que catalyseurs organiques est le résultat des études de la fonction biochimique de la vitamine B1. Selon la communauté scientifique qui les utilise, ces composés sont donc, soit bio-inspirés de solutions trouvées par l'évolution naturelle, soit des molécules artificielles nées du génie créateur humain. Cet article montre que, loin de s'opposer, ces deux visions se sont nourries l'une de l'autre, permettant le développement spectaculaire de ces composés en catalyse homogène, y compris radicalaire, et la compréhension fine de leur fonctionnement.

Mots-clés **Vitamine B1, catalyse, organocatalyse, complexes métalliques de carbènes, mécanisme de réaction, intermédiaires réactionnels, réaction radicalaire.**

Abstract **Vitamin B1 and *N*-heterocyclic carbenes: inspiration or invention?**
The narrative surrounding the emergence of *N*-heterocyclic carbenes as powerful tools in modern catalysis has two seemingly contradictory facets. Indeed, their introduction into organometallic catalysts is the result of a long process of development in synthetic molecular chemistry, spanning from the 1960s to the present day. In contrast, their use as organic catalysts has emerged from studies on the biochemical function of vitamin B1. Therefore, depending on the scientific community, these compounds are viewed either as bio-inspired solutions derived from natural evolution, or as artificial molecules born from human creativity. This article shows that, far from being opposed, these two perspectives have nourished one another, enabling the remarkable development of these compounds in homogeneous catalysis, including radical catalysis, and the fine understanding of their mode of action.

Keywords **Vitamin B1, catalysis, organo-catalysis, metal-carbene complexes, reaction mechanisms, reaction intermediates, radical reactions.**

https://doi.org/10.63133/scf.act-chim.2026.520.06

Les carbènes sont des molécules incorporant un atome de carbone divalent ne possédant formellement que six électrons de valence. Des articles de *L'Actualité Chimique* ont déjà été consacrés au développement de leur versions stables, et plus particulièrement aux carbènes *N*-hétérocycliques, souvent désignés par leur acronyme anglais NHC [1,2]. Depuis leur découverte à la fin du XX^{e} siècle, ces composés sont devenus des réactifs originaux pour l'activation de petites molécules et la conception d'espèces inusuelles, mais surtout des ligands incontournables pour les métaux de transition. Ce sont par exemple les composants essentiels de catalyseurs efficaces à base de ruthénium pour la métathèse des oléfines, eux aussi traités dans plusieurs articles de *L'Actualité Chimique* [3-5].

Il existe également des carbènes *N*-hétérocycliques naturels, dérivés de la vitamine B1 (ou thiamine). Ce sont des cofacteurs enzymatiques permettant la catalyse de transformations essentielles liées à la glycolyse, les cycles de Krebbs et de Calvin. L'étude de ces processus biologiques a inspiré l'utilisation de modèles moléculaires simplifiés de la thiamine comme organocatalyseurs dès les années 1960. Bien que ces travaux soient antérieurs au développement de la chimie de coordination des NHC, c'est cette dernière qui a permis de forger le concept même de carbène stable et qui est donc souvent associée à l'émergence de leurs applications en catalyse au début du XXI^{e} siècle.

Les NHC peuvent donc être considérés aussi bien comme des molécules inspirées du vivant, ou comme des créations moléculaires purement artificielles. De fait, ces deux récits de la genèse des carbènes *N*-hétérocycliques, liés à des champs disciplinaires différents, ont longtemps coexisté indépendamment l'un de l'autre.

En biochimie et chimie organique, les carbènes *N*-hétérocycliques sont des organocatalyseurs bio-inspirés de la thiamine

La vitamine B1

À la fin du XIX^{e} siècle, Takaki Kanehiro, un médecin militaire japonais, remarqua que le béribéri, une maladie très problématique pour la marine japonaise, était peu présente sur les navires occidentaux. De plus, les officiers, qui bénéficiaient de repas variés, étaient peu atteints, contrairement au reste des équipages qui se nourrissait essentiellement de riz blanc. Il proposa donc un lien entre cette maladie et une carence alimentaire et compara deux équipages différents.

L'introduction d'un régime diversifié sur le même trajet à travers le Pacifique permit de réduire le taux d'incidence du béribéri de 45 à 5 %. En 1897, Christiaan Eijkman, un médecin exerçant dans la colonie hollandaise de Batavia, fit une découverte similaire en expérimentant sur des poules, qu'il nourrit de riz décortiqué, provoquant un béribéri artificiel, guérissable en introduisant du riz complet dans leur régime. Il en conclu l'existence d'une nouvelle substance vitale qu'il appela vitamine « aneurique ». Ce composé fut isolé de l'écorce de riz au Japon par Umetarō Suzuki, dès 1911, qui l'appela acide abérique. À noter que les résultats des scientifiques japonais restèrent longtemps ignorés en Europe et ce fut Eijkman qui reçut le prix Nobel de médecine en 1929 pour sa découverte.
La première isolation et cristallisation univoque de ce composé, désormais appelé vitamine B1, furent rapportées pour la première fois en Occident par Jansen et Donath en 1926. Robert William détermina sa structure chimique en 1935 et l'appela thiamine, un mot valise se référant à l'atome de souffre contenu dans cette vitamine.

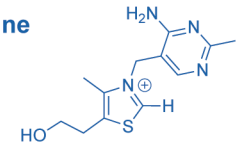
Les fonctions biochimiques de la thiamine et la proposition mécanistique de Breslow

Il est désormais bien établi que l'alimentation est la seule source de vitamine B1 pour les vertébrés, qui ne peuvent en produire. Les formes actives de la thiamine sont formées par phosphorylation dans le foie. Elles ont des rôles non enzymatiques importants dans les systèmes nerveux et musculaires (les symptômes du béribéri comprennent paralysies et lésions nerveuses), dont les mécanismes sous-jacents sont encore mal compris. De tous ces dérivés, c'est la thiamine pyrophosphate qui a été le plus étudié. Il s'agit d'un cofacteur associé à plusieurs types d'enzymes importantes (*encadré 1* p. 36). Ainsi, les pyruvate déshydrogénases font le lien entre la glycolyse et le cycle de Krebs, qui permet de récupérer de l'énergie chimique sous forme d'ATP. Les 2-oxoglutarate déshydrogénases catalysent la transformation du 2-oxoglutarate en succinyl-coenzyme A, qui est l'étape cinétiquement déterminante du cycle de Krebs. Enfin, les transcétolases participent à la voie métabolique des pentoses phosphates et, chez les plantes, à la photosynthèse (cycle de Calvin).
Il s'agit essentiellement de réactions de dégradation, *a priori* peu intéressantes pour les chimistes de synthèse désirant accéder à des molécules possédant des squelettes carbonés complexes. Cependant les cycles catalytiques sont réversibles et peuvent fonctionner dans les deux sens. Ainsi, au milieu du XX^{e} siècle, Ukai [6] et Mizuhara [7] montrent que la thiamine peut catalyser des réactions de condensation benzoïnique, impliquant la création de liaisons carbone-carbone. Ces réactions de condensation étaient déjà connues pour être catalysées par des nucléophiles, tels que les ions cyanure. Il y eut plusieurs propositions concernant le site nucléophile de la thiamine en jeu dans ces réactions (le fragment pyrimidine est notamment proposé), mais aucune n'était pleinement satisfaisante.
En 1958, Breslow émit l'hypothèse que le véritable catalyseur est une forme basique de la thiamine résultant de sa déprotonation du cycle soufré thiazolium [8]. Le chimiste moderne reconnaitra immédiatement un carbène *N*-hétérocyclique stabilisé, mais cette notion n'émergera que plusieurs décennies plus tard et aurait parue absurde à l'époque. Ainsi, Breslow préféra se raccrocher à la formule mésomère mésoionique (faisant apparaître des charges) de ce composé pour le décrire et l'appela « ylure activé ». Il proposa que l'attaque nucléophile de cet ylure sur un aldéhyde conduisait à la formation d'une énamine, qui est connue de nos jours sous le nom d'intermédiaire de Breslow. Dans ce composé, le carbone issu de l'aldéhyde, originellement électrophile, est devenu nucléophile du fait de la polarisation de l'énamine. Cette inversion de réactivité, désignée sous le terme d'*umpolung* en chimie organique, est la clé de l'activité catalytique des dérivés de la thiamine. En effet, le carbone, désormais centre nucléophile, peut alors réagir avec un centre électrophile (ici, un autre aldéhyde libre) pour conduire à la formation d'une liaison carbone-carbone. L'enchainement d'une prototropie et du départ de l'ylure permet de former le produit final et de libérer le catalyseur pour un nouveau cycle (*encadré 1* : Mécanisme 1). Le même cycle catalytique, mais parcouru en sens inverse, décrit les réactions de rupture de liaison carbone-carbone des α-hydroxycétones promues par les enzymes. Les formations *in vivo* de thioéther impliquent quant à elles, ou bien une oxydation à deux électrons de l'intermédiaire de Breslow pour former un cation acylium très électrophile, ou bien l'addition oxydante de l'intermédiaire de Breslow sur une fonction disulfure (*encadré 1* : Mécanismes 2).
En 1974, Stetter montra que la réaction de condensation benzoïnique pouvait être étendue à des nucléophiles accepteurs de Michael, pour la synthèse de dérivés de γ-dicétones (réaction qui porte désormais son nom) [9]. Les réactions d'*umpolung* d'aldéhydes catalysées par des dérivés de thiamine en milieu basique connurent un développement relativement modeste pendant les années 1980, restant au plus proche des concepts mécanistiques proposés par Breslow.

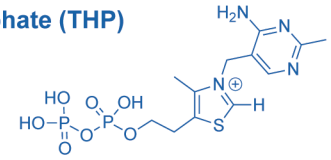
En chimie de synthèse, les carbènes *N*-hétérocycliques sont des ligands artificiels créés et développés pour la catalyse organométallique

Le concept de carbènes en tant qu'intermédiaires réactionnels s'est imposé en chimie organique, indépendamment des considérations relatives à l'activité biologique des dérivés de la thiamine (*encadré 2* p. 37). Avant la Première Guerre mondiale, Curtius [10] et Staudinger [11] avaient déjà montré que les carbènes générés à partir des composés diazo correspondants étaient extrêmement réactifs. Leur utilisation en synthèse pour l'obtention de cyclopropanes a été popularisée par Doering à partir de 1954 [12]. Dès 1962, Wanzlick essaya d'isoler des carbènes *N*-hétérocycliques, mais sans succès. Il observa que certains dimères de NHC avaient une réactivité semblable à celle attendue pour le carbène libre et émis l'hypothèse que l'équilibre de dimérisation de ces composés était réversible [13].
S'il ne semblait pas envisageable d'isoler des carbènes en tant qu'espèces libres, il était possible de les isoler dans la sphère de coordination de métaux de transition. Les premiers complexes, reportés par Ernst Fischer [14], possédaient un atome de carbone électrophile, du fait de la présence d'hétérosubstituants donneurs et de centres métalliques riches en électrons. Des complexes de carbènes présentant une polarisation inversée de la liaison carbone-métal furent décrits un peu plus tard par l'équipe de Richard Schrock [15]. Ainsi, une gamme de complexes carbéniques possédant une palette diversifiée de réactivités et de propriétés électroniques était accessible dès les années 1970. À la même époque, Yves Chauvin et son équipe de l'Institut Français du Pétrole avaient proposé que des complexes métalliques de carbènes étaient

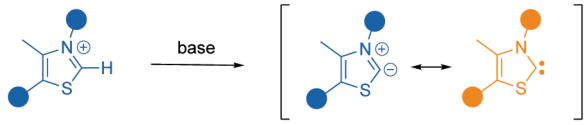
Thiamine



Thiamine-pyrophosphate (THP)



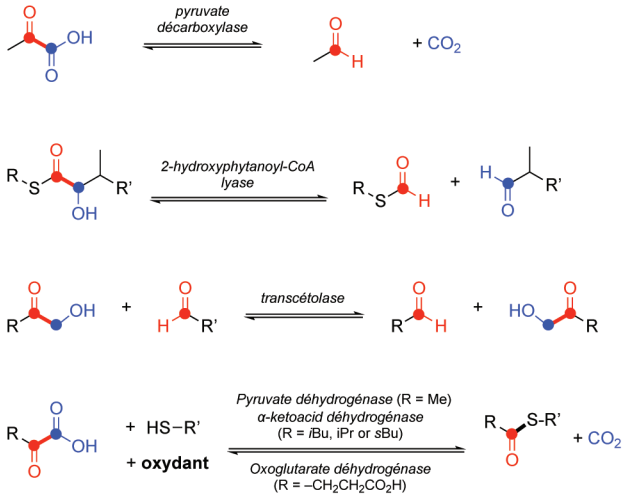
Les carbènes N-hétérocycliques (NHC)



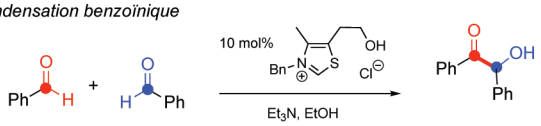
Les NHC sont générés à partir de leurs acides conjugués

2 formes mésomères permettent de décrire la structure de Lewis (structure électronique) d'un NHC

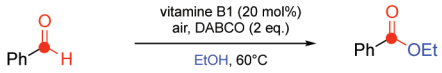
La THP est un cofacteur enzymatique (catalyseur biologique) ⇨ Catalyses organiques bio-inspirées



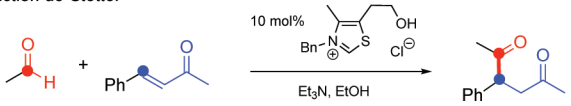
condensation benzoïnique



oxydation d'aldéhydes

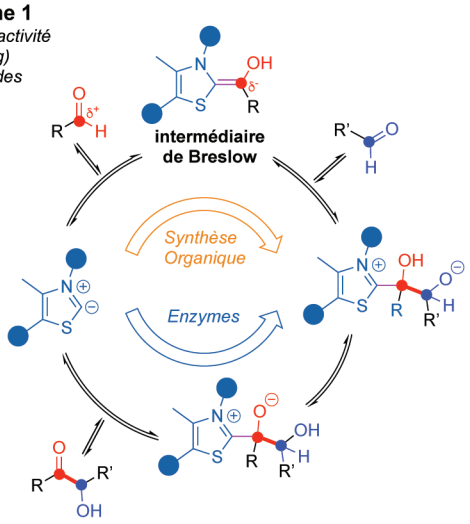


réaction de Stetter



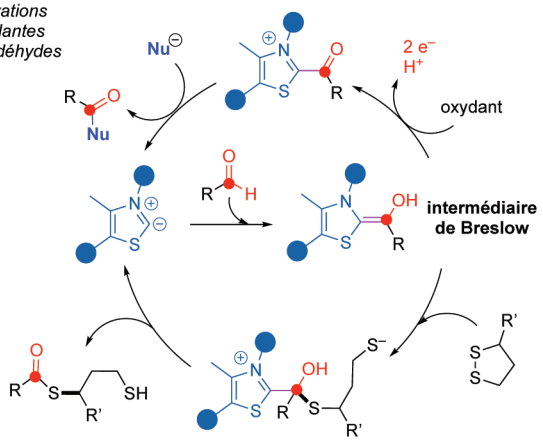
Mécanisme 1

Inversion de réactivité (umpolung) des aldéhydes

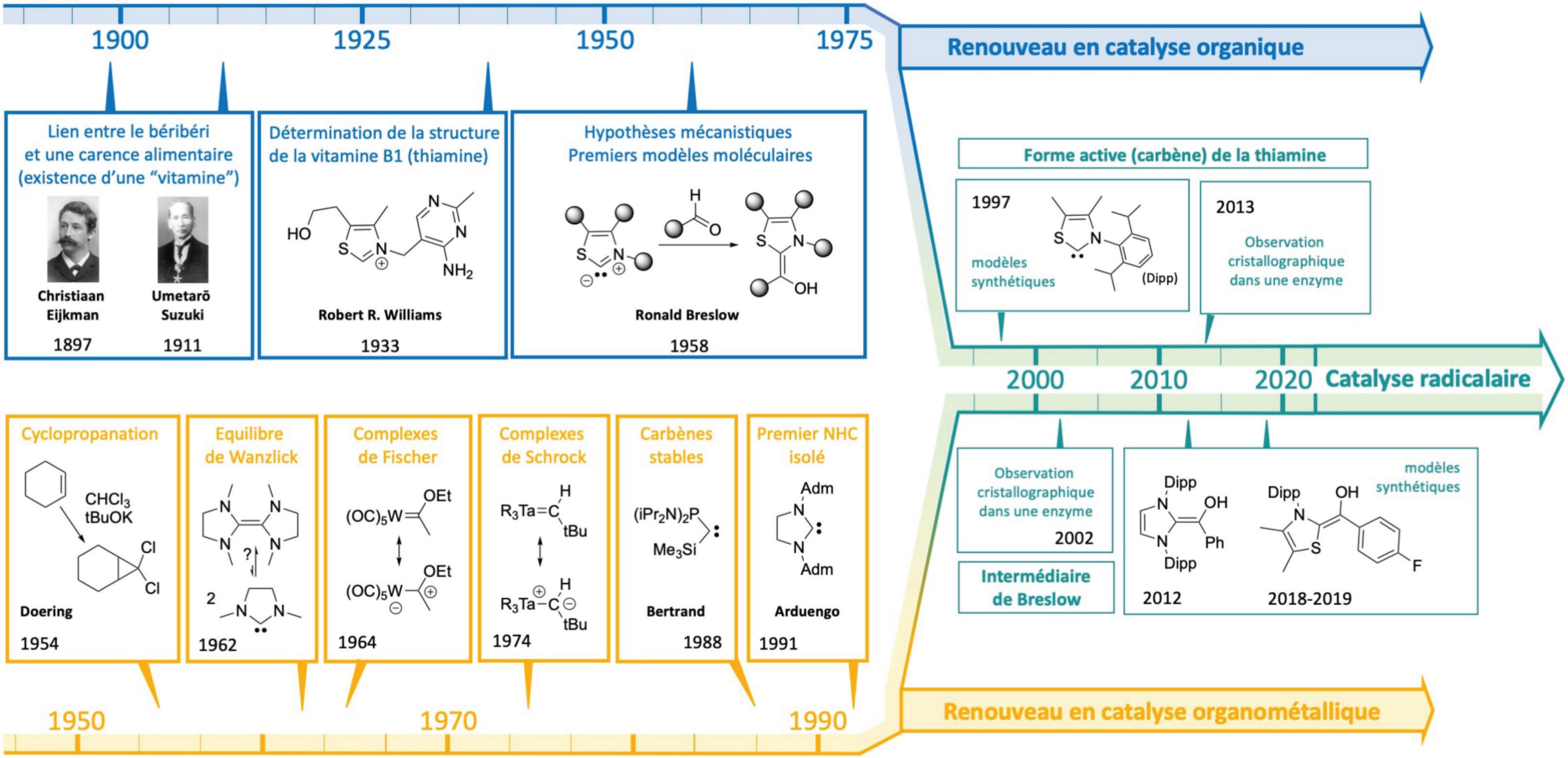


Mécanismes 2

Activations oxydantes des aldéhydes



Encadré 1 - Rôle biologique de la THP et bio-inspiration en synthèse organique.



Encadré 2 - Chronologies parallèles des découvertes concernant la thiamine et les carbènes *N*-hétérocycliques.

les intermédiaires de réactions importantes d'un genre nouveau, permettant de réarranger les alcènes entre eux (métathèse) [3]. Notons que même les complexes de carbènes *N*-hétérocycliques étaient connus et pouvaient être considérés comme un cas extrême de carbènes de Fischer, peu réactifs [16]. Cependant, leur utilisation en catalyse ne connut pas de développement notable avant la découverte que certains de ces carbènes étaient stables et isolables.

Le début de la chimie des carbènes stables remonte à 1988, avec l'isolation d'un phosphino-carbène acyclique, huile distillable qui fut décrite par le groupe de recherche toulousain de Guy Bertrand [17]. Non seulement cette équipe a contribué à la fondation d'un nouveau champ d'étude, mais aussi à son développement, en apportant des contributions majeures sans discontinuer pendant trois décennies [2]. Les carbènes *N*-hétérocycliques, quant à eux, furent isolés pour la première fois en 1991 par l'équipe d'Arduengo [18]. Les années suivant ces découvertes marquent le début d'un regain d'intérêt pour les NHC, puis d'un développement exponentiel de leur utilisation en catalyse homogène.

En catalyse organométallique, il est vite apparu que le remplacement de phosphines – des ligands alors très utilisés – au sein de complexes de métaux par des NHC conduisait souvent à des catalyseurs à la fois plus robustes et plus stables. Le succès des complexes de type « Grubbs » à base de ruthénium pour la catalyse de la métathèse des oléfines, inspirés des travaux antérieurs de Schrock et Chauvin, en est l'une des illustrations les plus spectaculaires [3-5].

En catalyse organique, l'équipe d'Enders a re-exploré les anciens travaux biomimétiques en utilisant un nouveau type de NHC basés sur des squelettes triazolium, s'éloignant de la structure des thiazoliums inspirée de la thiamine [19]. Ces travaux ont été à l'origine du développement spectaculaire de l'organocatalyse moderne utilisant les NHC, tout d'abord en revisitant les anciennes réactions de condensation benzoïniques et de Stetter, puis en étendant leur champ d'application bien au-delà.

La rencontre de deux champs disciplinaires

Des intermédiaires enfin mis en évidence, plus de 50 ans après la proposition de Breslow

En 1997, Arduengo rapporta la première isolation et structure cristallographique d'un thiazolylidène, un carbène incorporant un atome de souffre, modèle de la forme active de la thiamine [20]. Notons que ce composé n'est pas stable à proprement parler, mais seulement persistant, car il dimérise en solution en quelques jours. Une telle dimérisation est typique de la réactivité des carbènes. De façon plus générale, les études sur les NHC indiquent que la formule mésomère « carbénique » est la plus pertinente pour ces composés. À ce jour, le concept de carbène stable n'a diffusé que partiellement au sein des communautés dont les intérêts sont plus centrés sur la biochimie que la chimie moléculaire. Ainsi, le terme « ylure activé », initialement proposé par Breslow, est encore d'usage dans des articles et ouvrages généraux traitant de catalyse enzymatique. Par contre, ces changements de paradigme n'ont pas échappé à l'équipe de Tittmann qui, s'appuyant sur les avancées de la chimie des NHC, a pu mettre en évidence en 2013 le carbène issu de la thiamine au sein d'une enzyme par diffraction de rayons X à haute résolution [21]. Cette technique, à laquelle *L'Actualité Chimique* a déjà consacré plusieurs articles [22], permet de déterminer avec une très grande précision l'arrangement spatial des atomes d'une molécule au sein d'un monocristal en analysant la figure de diffraction d'une source X monochromatique par les nuages électroniques du composé. Les protons étant par nature entourés d'une faible densité électronique, ils sont souvent difficiles à situer. Or les résultats de chimie moléculaire avaient démontré que la déprotonation d'un NHC entrainait des raccourcissements significatifs de la liaison carbone-azote et de l'angle N-C-S. Les cristallographes ont pu s'appuyer sur ce type de changements structuraux pour attribuer sans ambiguïté l'état de protonation de la thiamine et démontrer la présence d'un carbène stable naturel au sein de l'enzyme.

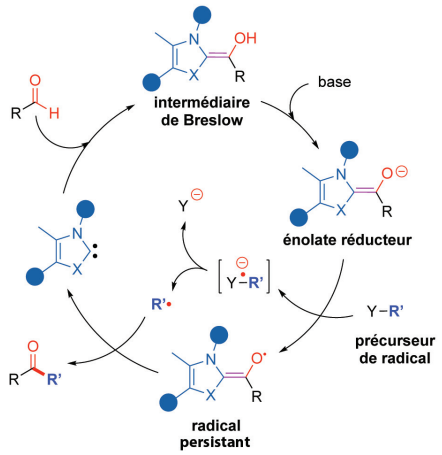
Un intermédiaire de Breslow – énol issu de la condensation de la thiamine diphosphate sur un aldéhyde – avait été mis en évidence au sein d'une enzyme par diffraction de rayons X plus tôt, en 2002 [23]. Dans ce cas, ce fut la synthèse de modèles moléculaires de ces composés à partir d'un NHC et d'un aldéhyde qui butait sur plusieurs obstacles : i) la formation préférentielle de la forme (tautomère) cétone de ces énols ; ii) la réactivité de ces énols en présence d'aldéhyde ; et iii) la formation de mélanges de nombreux composés en équilibre, du fait de la réversibilité de la réaction de condensation benzoïnique. À partir de 2012, le groupe de Berkessel a trouvé des combinaisons NHC/aldéhyde permettant l'observation, puis l'isolation de la forme énol de ces composés [24], plus de 50 ans après la formulation de l'hypothèse de leur existence par Breslow.

Les intermédiaires de Breslow pour réaliser des activations radicalaires ?

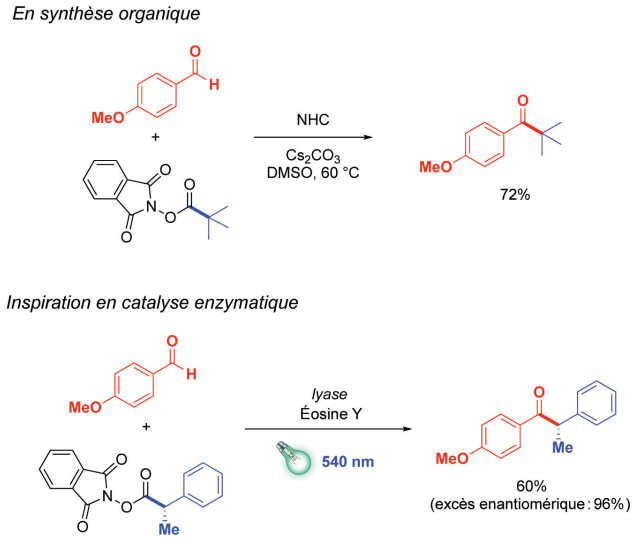
Suite à la caractérisation des intermédiaires clés des cofacteurs enzymatiques dérivés de la vitamine B1 et de leurs modèles simplifiés, l'attention s'est tournée vers l'exploitation de nouvelles voies mécanistiques. Ainsi, il était bien établi que l'intermédiaire de Breslow pouvait subir des oxydations à deux électrons pour conduire à la formation de dérivés d'esters à partir d'aldéhydes (*encadré 1* : Mécanismes 2). Par contre, la question de la « faisabilité » d'oxydations monoélectroniques, pour effectuer de nouvelles transformations radicalaires, restait en suspens.

L'oxydation à deux électrons d'intermédiaires de Breslow était connue pour pouvoir se faire séquentiellement, à l'aide d'oxydants monoélectroniques, tels que le (tétraméthylpipéridin-1-yl)oxyl (TEMPO). De même, la formation de radicaux avait pu être caractérisée par résonnance magnétique électronique lors de réactions oxydantes enzymatiques. Cependant, aucune réactivité nouvelle ne découlait de ces processus monoélectroniques. Les premières véritables transformations radicalaires d'aldéhydes catalysées par des NHC ne furent découvertes qu'à milieu des années 2010. À partir de 2019, ce champ d'étude a connu un développement exponentiel avec la découverte d'activations réductrices de substrats de plus en plus difficiles [25]. Notre équipe a contribué à cet essor, notamment avec l'étude électrochimique des modèles des intermédiaires de Breslow. Nous avons pu montrer que ces derniers étaient peu réducteurs [26] et que les intermédiaires clés étaient plus certainement leurs énolates [27], formés dans les conditions basiques de la catalyse par les NHC (*encadré 3*). Nos données indiquaient notamment que l'activation radicalaire d'iodures d'aryles – des substrats dont l'activation nécessite usuellement l'usage de métaux de transition – était à portée des NHC, ce qui fut démontré la même année, indépendamment par deux équipes [28]. Au-delà de la simple

Activation réductrice (mécanisme général)



Inspirations réciproques de la biochimie et de la chimie de synthèse



Encadré 3 - Réactions radicalaires utilisant les intermédiaires de Breslow.

fonctionnalisation radicalaire de dérivés d'aldéhydes, nous avons aussi montré qu'il était possible d'utiliser les NHC pour promouvoir des aldéhydes et les transformer catalytiquement en super-donneurs d'électrons. Bien sûr, de telles réactions étaient réalisables avec des réducteurs métalliques, mais produisaient des quantités stœchiométriques de sels de métaux oxydés, et non pas des molécules organiques, dérivés d'esters, *a priori* valorisables [29]. Ces cinq dernières années, de nombreuses variantes de réactions radicalaires catalysées par les NHC ont été mises au point, y compris des procédés coopératifs avec des catalyseurs métalliques ou des photocatalyseurs [25,30].

La chimie enzymatique s'inspire en retour de la catalyse organique radicalaire

L'histoire ne s'arrête pas sur le simple constat de l'émergence en chimie organique d'un nouveau domaine de l'organocatalyse inspiré à la fois de la chimie des NHC et de la biochimie de la thiamine. En effet, il a récemment été montré que les enzymes à cofacteurs basés sur la thiamine pouvaient, à leur tour, catalyser des réactions impliquant des substrats non naturels. Ces systèmes ont l'avantage de bénéficier de l'environnement de l'enzyme, qui est une protéine chirale, permettant d'obtenir les produits sous la forme d'un seul énantiomère (hautes énantiosélectivités), telles des réactions de condensations benzoïniques croisées, de Stetter ou de formose [31]. Fait remarquable, alors que la nature n'a pu – semble-t-il – mettre à profit des transformations radicalaires des intermédiaires de Breslow, Y. Xu *et coll.* ont pu utiliser une lyase (enzyme) à thiamine diphosphate pour réaliser sous irradiation des acylations radicalaires d'aldéhydes [32]. Les auteurs se sont inspiré des travaux de l'équipe d'Ohmiya et de leur usage d'esters redox-actifs en organocatalyse par les NHC [33]. Il y a cependant une différence notable : le transfert d'électron depuis l'intermédiaire de Breslow doit être photo-activé, car le pH du fonctionnement de l'enzyme est incompatible avec la formation d'un énolate réducteur.

En conclusion, si la découverte de la thiamine a largement précédé la chimie moléculaire des carbènes *N*-hétérocycliques, il serait inadéquat de réduire cette dernière à une approche simplement bio-inspirée. De fait, les catalyses moléculaire et enzymatique se sont continuellement nourries l'une de l'autre. Notre équipe espère prolonger sa contribution au développement spectaculaire de ces procédés de catalyse radicalaire homogène, en particulier *via* la compréhension fine de leur fonctionnement.

[1] V. César, S. Bellemin-Laponnaz, Les carbènes *N*-hétérocycliques : de formidables ligands pour la chimie organométallique, *L'Act. Chim.*, **2009**, *326*, p. 8-14.
[2] M. Soleilhavoup, M. Melaimi, D. Martin, G. Bertrand, Les carbènes stables : des curiosités de laboratoire devenues de puissants outils, *L'Act. Chim.*, **2013**, *370*, p. 20-27.
[3] D. Astruc, La métathèse : de Chauvin à la chimie verte, *L'Act. Chim.*, **2004**, *273*, p. 3-11.
[4] J. Cossy, La métathèse d'oléfines : une révolution au XX^e siècle pour la synthèse de molécules complexes, *L'Act. Chim.*, **2011**, *348-349*, p. 70-74.
[5] H. Olivier-Bourbigou *et al.*, La valorisation de la biomasse par métathèse des oléfines : un véritable enjeu pour demain, *L'Act. Chim.*, **2018**, *432*, p. 18-28.
[6] T. Ukai, S. Tanaka, S. Dokawa, New catalyst for the acyloin condensation, *J. Pharm. Soc. Jpn.*, **1943**, *63*, p. 296-300.
[7] S. Mizuhara, P. Handler, Mechanism of thiamine-catalyzed reactions, *J. Am. Chem. Soc.*, **1954**, *76*, p. 571-73.
[8] R. Breslow, On the mechanism of thiamine action. IV. Evidence from studies on model systems, *J. Am. Chem. Soc.*, **1958**, *80*, p. 3719-26.
[9] H. Stetter, H. Kuhlmann, Addition of aliphatic aldehydes to activated double bonds, *Angew. Chem. int. Ed.*, **1974**, *13*, p. 539.
[10] E. Buchner, T. Curtius, Ueber die Einwirkung von Diazoessigäther auf aromatische Kohlenwasserstoffe, *Ber. Dtsch. Chem. Ges.*, **1885**, *8*, p. 2377-79.
[11] H. Staudinger, O. Kupfer, Über Reaktionen des Methylens. III. Diazomethan, *Ber. Dtsch. Chem. Ges.*, **1912**, *45*, p. 501-09.
[12] W. E. Doering, A. K. Hoffmann, The addition of dichlorocarbene to olefins, *J. Am. Chem. Soc.*, **1954**, *76*, p. 6162-65.
[13] H.-W. Wanzlick, E. Schikora, Aspects of nucleophilic carbene chemistry, *Angew. Chem. Int. Ed.*, **1962**, *1*, p. 75-80.
[14] E. O. Fischer, A. Maasböl, On the existence of a tungsten carbonyl carbene complex, *Angew. Chem., Int. Ed. Engl.*, **1964**, *3*, p. 580-81.
[15] R. R. Schrock, Alkylcarbene complex of tantalum by intramolecular alpha-hydrogen abstraction, *J. Am. Chem. Soc.*, **1974**, *96*, p. 6796-97.

[16] H.-W. Wanzlick, H.-J. Schönherr, Direct synthesis of a mercury salt-carbene complex, *Angew. Chem. Int. Ed.*, **1968**, *7*, p. 141-42.
[17] A. Igau, H. Grützmacher, A. Baceiredo, G. Bertrand, Analogous α-α'-bis-carbenoid, triply bonded species: synthesis of a stable λ3-phosphino carbene-λ5-phosphaacetylene, *J. Am. Chem. Soc.*, **1988**, *110*, p. 6463-66.
[18] A. J. Arduengo, R. L. Harlow M. Kline, A stable crystalline carbene, *J. Am. Chem. Soc.*, **1991**, *113*, p. 361-63.
[19] (a) D. Enders *et al.*, Preparation, structure, and reactivity of 1,3,4-triphenyl-4,5-dihydro-1H-1,2,4-triazol-5-ylidene, a new stable carbene, *Angew. Chem. Int. Ed. Engl.*, **1995**, *34*, p. 1021-23 ; (b) D. Enders, O. Niemeier, A. Henseler, Organocatalysis by *N*-heterocyclic carbenes, *Chem. Rev.*, **2007**, *107*, p. 5606-55.
[20] A. J. Arduengo, J. R. Goerlich, W. J. Marshall, A stable thiazol-2-ylidene and its dimer, *Liebigs Ann./Recl.*, **1997**, *2*, p. 365-74.
[21] D. Meyer, P. Neumann, R. Ficner, K. Tittmann, Observation of a stable carbene at the active site of a thiamin enzyme, *Nat. Chem. Biol.*, **2013**, *9*, p. 488-90.
[22] Par exemple : (a) C. Aronica, La diffraction des rayons X, *L'Act. Chim.*, **2010**, *346*, p. 24-28 ; (b) C. Lecomte, E.-E. Bendeif, S. Pillet, Diffraction X haute résolution : les secrets de la liaison chimique révélés, *L'Act. Chim.*, **2011**, *356-357*, p. 118-22.
[23] E. Fiedler *et al.*, Snapshot of a key intermediate in enzymatic thiamin catalysis: crystal structure of the α-carbanion of (α,β-dihydroxyethyl)-thiamin diphosphate in the active site of transketolase from *Saccharomyces cerevisiae*, *Proc. Nat. Acad. Sci.*, **2002**, *99*, p. 591-95.
[24] (a) A. Berkessel *et al.*, Breslow intermediates from aromatic *N*-heterocyclic carbenes (benzimidazolin-2-ylidenes, thiazolin-2-ylidenes), *Angew. Chem. Int. Ed.*, **2018**, *57*, p. 8310-15 ; (b) A. Berkessel *et al.*, Breslow intermediates from a thiazolin-2-ylidene and fluorinated aldehydes: XRD and solution-phase NMR spectroscopic characterization, *Angew. Chem. Int. Ed.*, **2019**, *58*, p. 10596-600.
[25] (a) S. Chakraborty, S. Barik, A. T. Biju, *N*-Heterocyclic carbene (NHC) organocatalysis: from fundamentals to frontiers, *Chem. Soc. Rev.*, **2025**, *54*, p. 1102-24 ; (b) H. Cai, X. Yang, S.-C. Ren, Y. R. Chi, Radical reactions with *N*-heterocyclic carbene (NHC)-derived acyl azoliums for access to multifunctionalized ketones, *ACS Catal.*, **2024**, *14*, p. 8270-93.
[26] D. Martin *et al.*, What are the radical intermediates in oxidative *N*-heterocyclic carbene organocatalysis?, *J. Am. Chem. Soc.*, **2019**, *141*, p. 1109-17.
[27] L. Delfau *et al.*, Critical assessment of the reducing ability of Breslow-type derivatives and implications for carbene-catalyzed radical reactions, *Angew. Chem. Int. Ed.*, **2021**, *60*, p. 26783-89.
[28] (a) H. Ohmiya *et al.*, Aryl radical-mediated *N*-heterocyclic carbene catalysis, *Nature Commun.*, **2021**, *12*, 3848 ; (b) X. Yan *et al.*, Mesoionic carbene-Breslow intermediates as super electron donors: application to the metal-free arylacylation of alkenes, *Chem Catal.*, **2021**, *1*, p. 126-206.
[29] N. Assani *et al.*, A simple NHC for the catalytic up-conversion of aldehydes into stoichiometric SED, *Chem. Sci.*, **2024**, *15*, p. 14699-704.
[30] L. Delfau, E. Mauro, J. Pecaut, D. Martin, E. Tomás-Mendivil, Boosting NHC radical organocatalysis with nickel chemistry: a rational mechanistic study-based approach, *ACS Catal.*, **2024**, *14*, p. 7149-56.
[31] M. Szostak *et al.*, *N*-heterocyclic carbene (NHC) catalysis in enzymatic organic synthesis, *Coord. Chem. Rev.*, **2026**, *549*, 217319.
[32] Y. Yang *et al.*, A light-driven enzymatic enantioselective radical acylation, *Nature*, **2024**, *625*, p. 74-78.
[33] T. Ishii, Y. Kakeno, K. Nagao, H. Ohmiya, *N*-Heterocyclic carbene-catalyzed decarboxylative alkylation of aldehydes, *J. Am. Chem. Soc.*, **2019**, *141*, p. 3854-58.



Ludivine DELFAU est cheffe de projet R&D de l'entreprise BioInspired Medical Science. Elle a effectué sa thèse au Département de Chimie Moléculaire de Grenoble, intitulée « Synthèse, étude et applications de donneurs d'électrons issus de procédés organo-catalytiques bio-inspirés de la thiamine ». Elle a été lauréate du ***Prix de thèse Henri Kagan décerné par la division Chimie Organique (DCO) de la Société Chimique de France en 2025***.

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

IUPAC
EuChemS
European Chemical Society

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**

Les alcynes-SF_5, des briques moléculaires polyvalentes aux multiples applications

Lucas POPEK[1], **Nicolas BLANCHARD**[2] **et Vincent BIZET**[2]

[1] Technische Universität Braunschweig, Institut für Organische Chemie, 38106 Braunschweig, Germany.
[2] Laboratoire LIMA UMR 7042 CNRS, Université de Haute-Alsace, Université de Strasbourg, 68093 Mulhouse.
✉ vbizet@unistra.fr

Résumé Dans un contexte marqué par les enjeux environnementaux des PFAS, le groupement SF_5, souvent qualifié de « super CF_3 », émerge comme une alternative prometteuse. Ce travail exploite les alcynes-SF_5 comme plateformes synthétiques pour accéder à des molécules fluorées complexes, *via* des réactions d'hydroélémentation régio- et stéréosélectives (impliquant des nucléophiles azotés, oxygénés, soufrés) et des transformations de post-fonctionnalisation permettant une large diversification. Des études mécanistiques (expérimentales et théoriques) ont élucidé les spécificités électroniques du motif SF_5, expliquant sa réactivité distincte de celle du CF_3. Une stratégie catalysée au palladium a permis un accès sélectif aux 2-SF_5-indénols, suivis de leur fonctionnalisation, tandis que l'addition radicalaire de SF_5Cl a ouvert la voie aux ynamides-SF_5, une nouvelle famille de briques moléculaires hautement réactives. Ces résultats soulignent le potentiel synthétique des alcynes-SF_5 comme outils polyvalents pour la conception de molécules fluorées innovantes.

Mots-clés **Pentafluorosulfanyle, SF_5, alcynes, hydroélémentation, indénol, ynamides.**

Abstract **SF_5-Alkynes: versatile molecular building blocks with multiple applications**
In a context marked by the environmental concerns related to PFAS, the development of novel fluorinated motifs with unique properties is a major challenge. Among these, the pentafluorosulfanyl (SF_5) group, often nicknamed "super-CF_3", is emerging as a promising alternative to classical perfluoroalkyl motifs, particularly CF_3. This work explores SF_5-substituted alkynes as synthetic platforms to access a wide diversity of complex fluorinated molecules. We developed regio- and stereoselective hydroelementation reactions involving various nucleophiles (nitrogen-, oxygen-, and sulfur-based), as well as post-functionalization transformations enabling broad molecular diversification. Experimental and computational mechanistic studies revealed the electronic peculiarities of the SF_5 motif, explaining its distinct reactivity compared to CF_3. A palladium-catalyzed strategy enabled selective access to 2-SF_5-indenols, followed by their functionalization, while the radical addition of SF_5Cl unlocked the synthesis of SF_5-ynamides, a new family of highly reactive building blocks. These results highlight the synthetic potential of SF_5-alkynes as versatile tools for organic chemistry and the design of innovative fluorinated molecules.

Keywords **Pentafluorosulfanyl, SF_5, alkynes, hydroelementation, indenol, ynamides.**

https://doi.org/10.63133/scf.act-chim.2026.520.07

Le fluor, élément incontournable aux multiples usages et problématiques liées aux PFAS

La liaison carbone-fluor, bien que très polarisée, est extrêmement forte et très faiblement polarisable, ce qui lui confère une meilleure résistance à la chaleur ou au rayonnement UV. Les propriétés uniques de cet atome lui ont permis d'acquérir un rôle de plus en plus important dans de nombreux domaines de notre quotidien : imagerie, Téflon® ou encore médicaments, avec environ 15-20 % des médicaments les plus vendus contenant au moins un atome de fluor. Cette omniprésence s'explique par l'impact du fluor et des groupes fluorés sur l'activité biologique et les propriétés physico-chimiques des molécules, permettant de moduler leurs paramètres pharmacocinétiques et favorisant l'essor de substituants polyfluorés (*figure 1*) [1].
Cependant, depuis peu, le groupement CF_3, ainsi que plusieurs autres groupements perfluorés, se retrouvent au centre de toutes les attentions. Extrêmement persistants, les PFAS (substances per- et polyfluoroalkylées) s'accumulent dans l'environnement et peuvent exposer les populations à travers

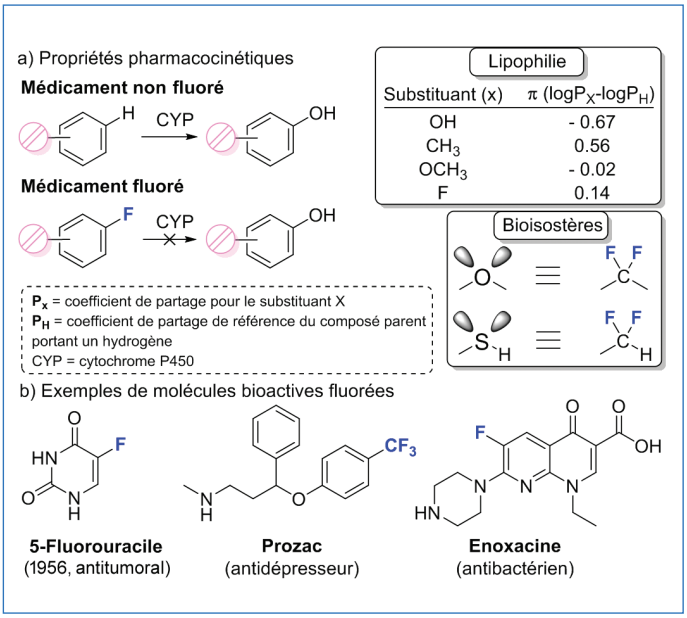


Figure 1 - Le fluor : propriétés et applications.

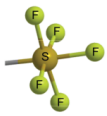
l'air, les aliments, l'eau, ou encore différents objets du quotidien. De ce fait, de plus en plus de pays et d'institutions ont instauré des restrictions et des règles pour leur utilisation [2]. Un des enjeux et défis de la recherche est de trouver des alternatives à ces « polluants persistants » tout en continuant d'utiliser l'atome de fluor qui offre des propriétés inégalées. C'est dans cette optique que de nouveaux groupements fluorés dits « émergents » ont vu le jour, avec parmi eux le groupement SF_5 [3].

Le SF_5, un « super CF_3 » ?

Bien que découvert dans les années 1950, le SF_5 fut considéré comme un groupement fluoré exotique pendant plusieurs décennies, avant de susciter un regain d'intérêt. De nombreux groupes académiques et entreprises commencent à étudier ce motif fluoré plus en détail en raison de la problématique grandissante des PFAS. Fréquemment appelé « super CF_3 », le SF_5 est bien souvent comparé au CF_3 du fait de ses propriétés physicochimiques proches mais exaltées, ce qui lui vaut des applications récentes en recherche de candidats médicaments par exemple, mais également en science des matériaux (OLED, LCD) et en catalyse [4].

Propriétés physicochimiques du SF_5 (*figure 2*) [5]

Le groupe SF_5 est constitué d'un atome de soufre (VI) hypervalent, lié à cinq atomes de fluor et le plus souvent à un atome de carbone. Sur le plan structural, le SF_5 adopte une géométrie octaédrique distordue, dite pseudo-octaédrique puisque tous les angles ne sont pas équivalents. Le groupe SF_5 possède une électronégativité de 3,65 (échelle de Pauling), supérieure à celle du CF_3, mais inférieure à celle du fluor. Cette forte électronégativité en fait un groupe attracteur d'électrons puissant, avec un effet inductif marqué ($\sigma_i = 0{,}55$). Contrairement au CF_3, le SF_5 présente un faible effet mésomère donneur (+M), mais une forte composante inductive (-I), ce qui stabilise les carbanions adjacents et déstabilise les carbocations. Le groupe SF_5 possède un volume de van der Waals de 61,4 Å^3, compris entre le CF_3 et le *tert*-butyle, tout en ayant une lipophilie plus importante, ce qui améliore la perméabilité membranaire des composés qui le contiennent.





Propriétés	SF_5	CF_3
Géométrie	pseudo-octaédrique	tétraédrique
Électronégativité	**3,65**	3,36
Constante de Hammett (σ_p)	**0,68**	0,54
Effet inductif (σ_i)	**0,55**	0,39

Figure 2 - Propriétés physicochimiques du SF_5.

Devenir du SF_5 dans un monde sans PFAS ?

Le groupe pentafluorosulfanyle étant basé sur le soufre et non sur le carbone, les composés SF_5 ne sont pas classés comme PFAS selon la définition juridique actuelle. Cette distinction fait des composés SF_5 une alternative attrayante pour le développement de molécules fluorés non considérées comme PFAS. Concernant l'impact environnemental, il y a encore peu d'études de dégradation de ces composés, mais les premières études mettent en évidence que certaines bactéries que l'on retrouve dans le sol (*Pseudomonas*) [6] peuvent dégrader ces composés R-SF_5. Bien que ces résultats soient extrêmement encourageants, les mécanismes globaux de dégradation des composés SF_5 restent mal compris, et leurs effets à long terme nécessitent davantage de recherches.

Accès au motif SF_5

Les méthodes d'introduction du motif SF_5 restent peu nombreuses et reposent principalement sur la fluoration oxydante de dérivés soufrés avec construction du motif SF_5 (*figure 3a*), ou *via* l'introduction directe du motif SF_5 *via* une addition radicalaire d'un groupement $^{\bullet}SF_5$ sur un alcène ou un alcyne terminal (*figure 3b*) [7]. Au cours des dernières années, la synthèse d'alcynes SF_5 a été considérablement améliorée, donnant une nouvelle impulsion au développement de briques élémentaires contenant le motif SF_5.

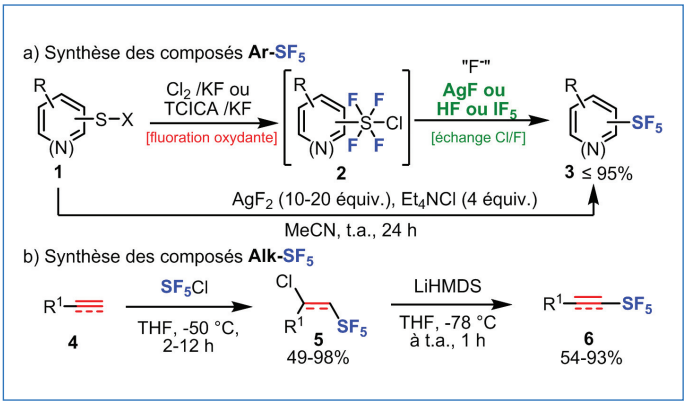


Figure 3 - Méthodes de synthèse des composés SF_5.

Lorsque nous avons commencé à étudier cette thématique, les alcynes-SF_5 décrits dans la littérature ne comportaient que très peu de diversité fonctionnelle et les applications de ces alcynes se limitaient aux réactions d'hydrofonctionnalisation et de cycloaddition [8]. Nous avons décidé d'étendre leurs applications pour la synthèse de composés SF_5 plus complexes. Nous avons ainsi développé l'hydroélémentation régio- et stéréosélective d'alcynes-SF_5, ainsi que la fonctionnalisation de ces produits (*figure 4a*) [9]. Dans un second temps, nous nous sommes intéressés à la synthèse régiosélective de 2-SF_5-indénols *via* une réaction d'arylation catalysée au palladium suivie de cyclisation (*figure 4b*) [10]. Enfin, la troisième partie traite de la synthèse d'ynamides-SF_5 et de leur réactivité (*figure 4c*) [11].

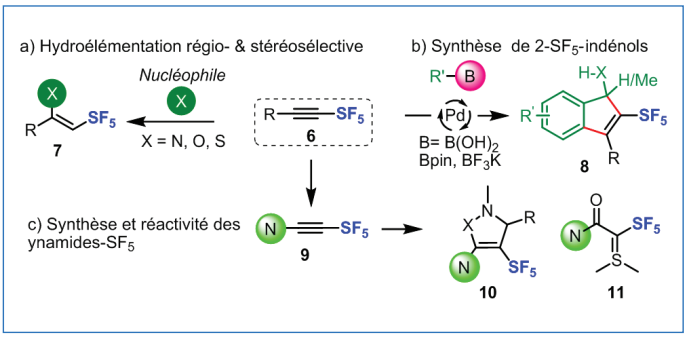


Figure 4 - Présentation des sujets de recherche.

Réactions d'hydroélémentation régio- et stéréosélective d'alcynes-SF_5 [9]

L'hydroélémentation des alcynes constitue une stratégie clé pour accéder à des motifs structuraux présents dans de nombreux médicaments et molécules d'intérêt biologique. Étonnamment, un unique exemple d'hydroélémentation d'alcynes SF_5, a été rapporté en 1964, et décrit l'addition de méthanol sur un alcyne SF_5 en présence de potasse, conduisant à des produits *cis* ou *trans* selon le substrat de départ, sans explication mécanistique claire [12]. Notre équipe s'est ainsi intéressée à l'hydroélémentation des alcynes-SF_5, avec pour objectif de rationaliser les sélectivités observées. En utilisant l'alcyne interne **6** comme substrat modèle et l'imidazole comme nucléophile dans le THF, la transformation s'est révélée quantitative et a conduit à la formation d'un unique régio- et stéréoisomère **7**. La configuration β,*Z* du produit obtenu a été formellement établie par diffraction des rayons X. Encouragés par ces résultats, nous avons entrepris l'étude du champ d'application de la réaction d'hydroamination des alcynes SF_5. Une optimisation rapide des conditions réactionnelles a permis d'identifier la combinaison NaH/DMSO comme particulièrement efficace, assurant une bonne solubilité des réactifs, des conversions complètes et une excellente régio- et stéréosélectivité. Une large gamme de nucléophiles (N, O, S) s'est révélée compatible, permettant l'accès à une cinquantaine de dérivés de configuration exclusive β,*Z* (*figure 5*).

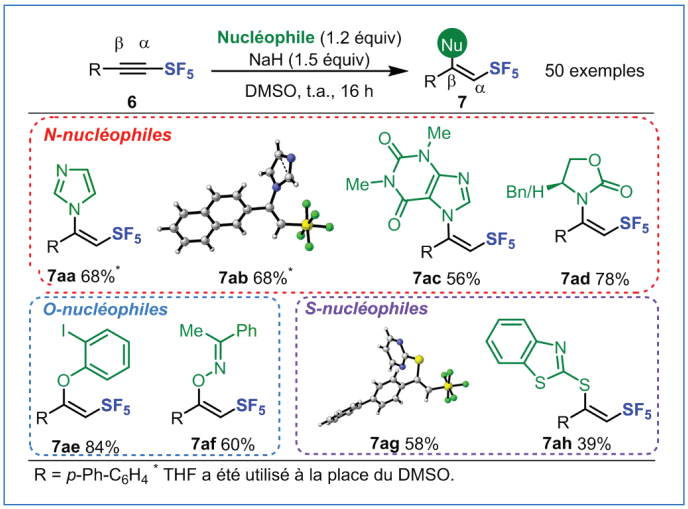


Figure 5 - Champ d'application de la réaction d'hydroélémentation des alcynes SF_5.

Nous avons alors développé des conditions d'hydrolyse des énamines, ce qui constitue une nouvelle méthode de formation de cétone α-SF_5 **14** (*figure 6a*). Cette méthode repose sur l'addition de pyrrolidine ou de pipéridine sur un alcyne SF_5 suivie d'une hydrolyse acide. L'intérêt synthétique de ces composés a été démontré par des réactions de post-fonctionnalisation telles que des réactions de couplages croisés (*figure 6b*).

Nous avons réalisé une étude mécanistique appuyée par des calculs DFT en collaboration avec Karinne Miqueu de l'Université de Pau afin de mieux appréhender la réactivité particulière des alcynes SF_5 **6** (*figure 7*). Ces alcynes sont polarisés, le carbone en α (C_α) possède une charge partielle négative, tandis que le carbone en β (C_β) possède une charge partielle positive, avec une différence de charge (Δq) quasiment deux fois supérieure à celle observée pour les alcynes CF_3. Cette forte polarisation combinée à une forte répulsion

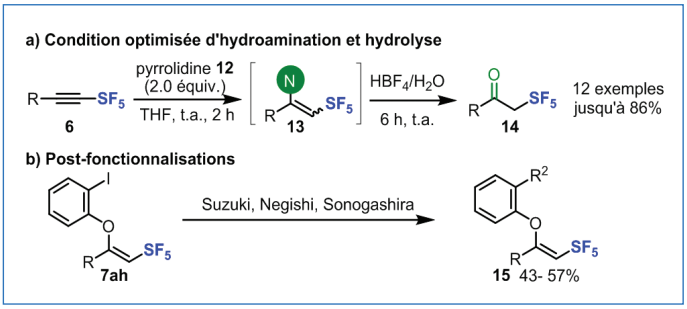


Figure 6 - Hydrolyse et post-fonctionnalisations.

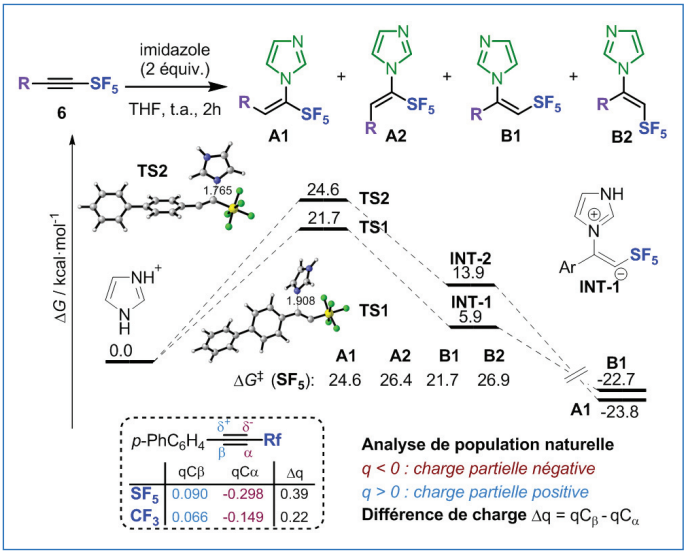


Figure 7 - Calculs DFT de la réaction d'hydroamination des alcynes SF_5.

stérique du SF_5 bloque l'addition de nucléophiles en position α du SF_5, ce qui explique la régiosélectivité obtenue. La stéréosélectivité *Z*, quant à elle, a pour origine la différence d'énergie entre les deux états de transition en compétition (TS1 *vs* TS2, 2,9 kcal/mol).

Ces premiers résultats d'hydroélémentation nous ont permis de mieux comprendre la réactivité des alcynes-SF_5 et ainsi explorer la réactivité d'autres types de nucléophiles.

Synthèse régiosélective de 2-SF_5-indénols catalysée au palladium [10]

Le noyau indénone est un squelette privilégié présent dans de nombreux produits naturels et qui présente des activités biologiques diverses : anticancéreux, antioxydant, traitement de la maladie d'Alzheimer, etc. (*figure 8a*) [13]. L'incorporation d'un motif fluoré dans une structure organique modifie les propriétés physicochimiques, permettant un ajustement fin des propriétés pharmacocinétiques. Malheureusement, seules deux méthodes décrivent l'incorporation d'un motif fluoré en position C_2 ou C_3 des indénones [14]. Nous avons donc exploré la synthèse d'indénol-SF_5 en utilisant la catalyse au palladium, avec comme objectif de contrôler la régiosélectivité et d'utiliser ces structures comme plateforme pour la synthèse de molécules SF_5 plus complexes (*figure 8b*).

L'optimisation a identifié une combinaison de $Pd(OAc)_2$ (5 % mol) et de 1,2-bis(diphénylphosphino)-éthane (dppe) (5 % mol) comme système catalytique optimal permettant de faire réagir un acide boronique **16** et un alcyne SF_5 **6**, conduisant après 2 h à 70 °C au 2-SF_5-indénol **8** comme unique produit de la réaction (*figure 9*). Les conditions se sont avérées

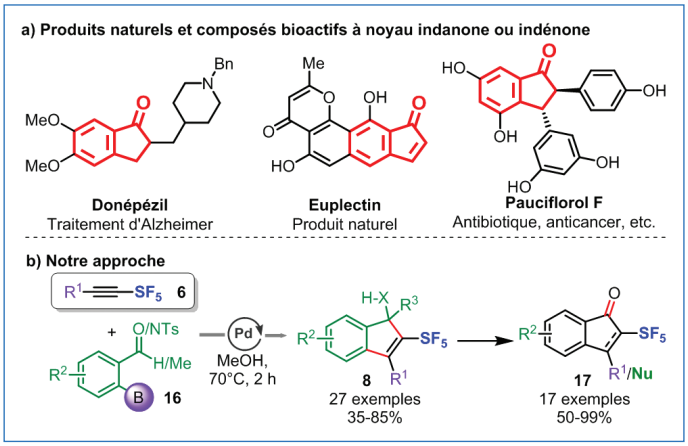


Figure 8 - Exemples d'indanones/indénones bioactives et synthèse régiosélective d'indénol 2-SF_5.

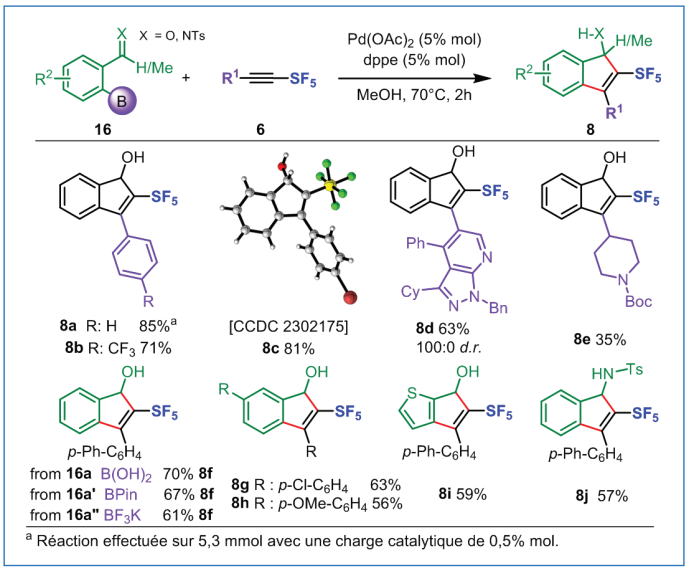


Figure 9 - Champ d'application de la synthèse de 2-SF_5-indénols.

efficaces avec tous les alcynes SF_5 que nous avons testés (17 exemples), menant toujours à la formation d'un unique régioisomère. Par la suite, la réaction a été étendue à une large gamme d'acides boroniques commercialement disponibles et diversement substitués, et nous avons également été ravis de constater que la réaction ne se limite pas à des dérivés d'acide boronique puisqu'un ester boronique **16a'** ou un sel de trifluoroborate de potassium **16a''** donnent des rendements similaires.

Les indénols SF_5 ont pu ensuite être oxydés en indénones dans des conditions douces utilisant un excès de MnO_2 dans le dichlorométhane à température ambiante. Ces indénones SF_5 peuvent réagir avec des nucléophiles « durs » (MeLi ou allyl-Zn) pour conduire sélectivement à une addition nucléophile 1,2 sur le carbonyle, tandis qu'avec des nucléophiles « mous » (thiols ou amines), il a été possible d'obtenir des rendements quantitatifs d'addition 1,4 conjuguée diastéréosélective (*figure 10*). Ceci montre la polyvalence de ces indénones et leur fonctionnalisation aisée même à des stades de synthèse avancés.

Synthèse et étude de la réactivité des ynamides-SF_5 [11]

Les alcynes substitués par des hétéroatomes, tels que les ynamides, représentent une classe d'alcynes polarisés particulièrement polyvalents. À ce jour, la synthèse d'ynamides est

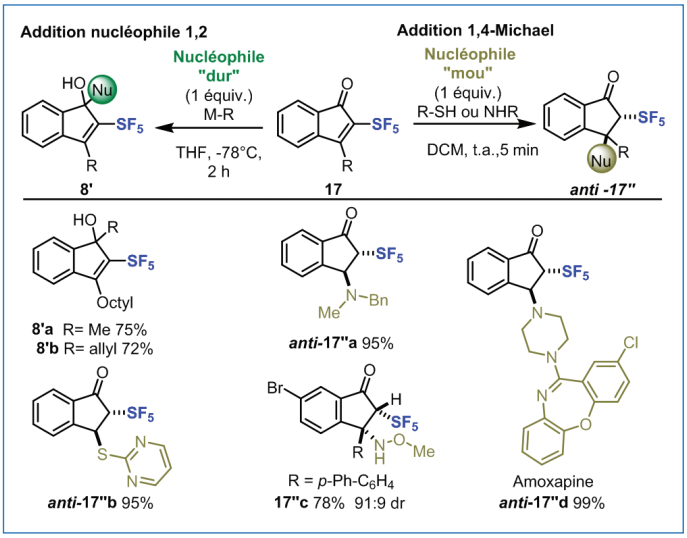


Figure 10 - Post-fonctionnalisation des 2-SF_5-indénones.

bien établie mais les ynamides comportant un groupement fluoré demeurent rares. Nous avons ainsi envisagé la synthèse d'ynamides-SF_5 **9** dans le but de développer de nouvelles classes de composés pentafluorosulfanylés fonctionnalisés. En collaboration avec l'équipe de Christophe Meyer, à ESPCI Paris-PSL, nous avons entrepris de synthétiser des ynamides-SF_5 et d'étudier leur réactivité dans diverses réactions de fonctionnalisation (*figure 11*).

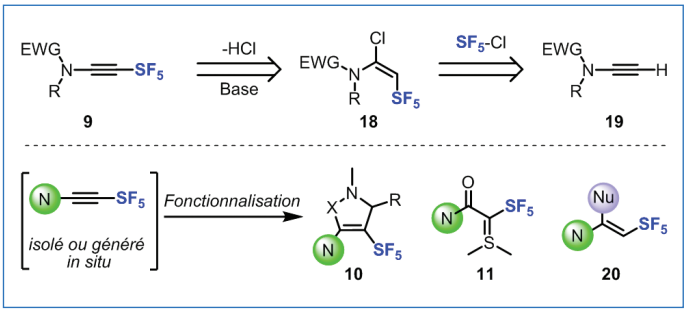


Figure 11 - Stratégie envisagée pour la synthèse d'ynamides-SF_5 et leur fonctionnalisation.

Nous avons commencé notre étude par la réaction entre un ynamide terminal **19** dans les conditions classiques de pentafluorosulfanylation décrites précédemment [15]. Malheureusement, aucune d'entre elles n'a donné de résultat satisfaisant, conduisant à des mélanges complexes. Il est important de noter ici que les ynamides sont d'excellents nucléophiles et que le SF_5Cl est une bonne source de chlore électrophile. Ainsi, lorsque la réaction radicalaire initiale n'est pas efficace, les ynamides **19** peuvent subir une réaction de chlorofluoration ionique. Pour contourner cette réactivité non désirée, nous avons généré les radicaux $^{\bullet}SF_5$ dans un premier temps avant d'additionner l'ynamide dans un second temps. Ce système plus général délivre avec de très bons rendements les β,*E*-chloro-énamides **18** quelle que soit la nature de l'ynamide. La séquence synthétique complète pour former les ynamides-SF_5 **9** à l'aide d'une base, s'est révélée une étape simple avec de nombreux précurseurs (hydrazine, urée, carbamate…) (*figure 12*).

Afin de tirer parti de la réactivité forte de certains intermédiaires, nous avons mis en place des stratégies d'hydroélémentation en un seul pot permettant la génération *in situ* d'ynamides-SF_5 suivie de leur piégeage par des nucléophiles azotés ou oxygénés conduisant aux produits **20** (*figure 13*).

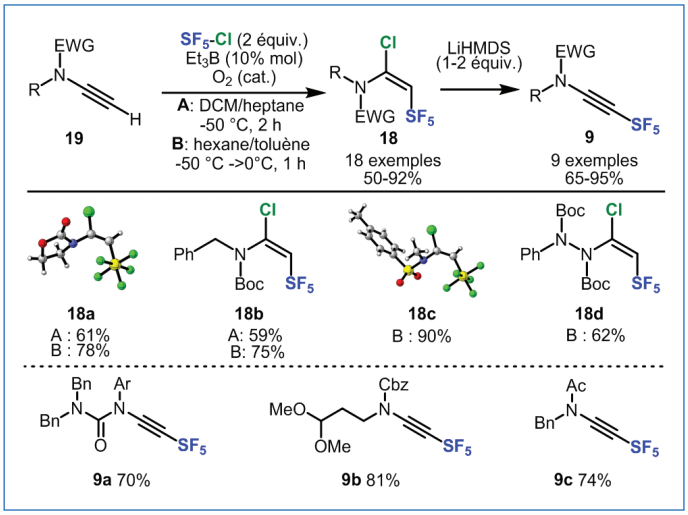


Figure 12 - Synthèse des ynamides-SF_5.

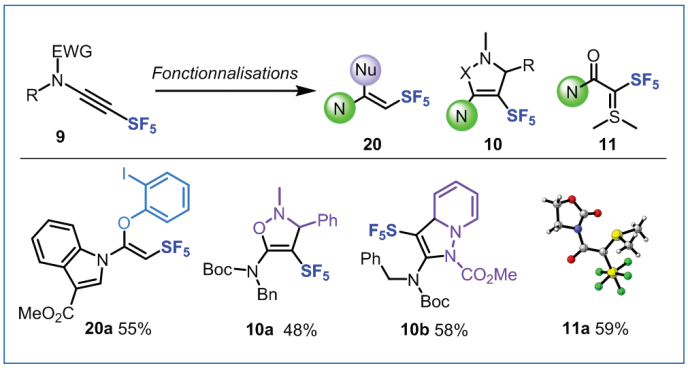


Figure 13 - Sélection de réactions de fonctionnalisation des ynamides-SF_5.

Par ailleurs, avons mis en évidence une réactivité originale en présence de DMSO, conduisant à la formation inattendue d'ylures de soufre, tels que **11a**, *via* un réarrangement de type Pummerer, représentant les premiers exemples d'ylures contenant un groupement SF_5. Enfin, nous avons confirmé que ces ynamides constituent des plateformes synthétiques polyvalentes, participant efficacement à des cycloadditions 1,3-dipolaires, permettant d'accéder à une diversité d'hétérocycles **10** (isoxazolines, aminoindolizines et pyrazolo[1,5-*a*]pyridines), élargissant ainsi la bibliothèque chimique des produits contenant du SF_5.

Perspectives

Le groupement SF_5, souvent qualifié de « super CF_3 », est finalement bien différent et présente des propriétés et réactivités distinctes du CF_3. Nous avons exploré de nouvelles utilisations de ces alcynes-SF_5 pour la construction de molécules complexes. Nous avons d'abord mis au point une réaction d'hydroélémentation générale avec divers nucléophiles, obtenant des produits de manière régio- et stéréosélective. Les 2-SF_5-indénols et dérivés associés ont ensuite été préparés *via* une cyclisation régiosélective catalysée au palladium, avec des fonctionnalisations complémentaires démontrant leur polyvalence. Enfin, nous avons développé la première méthode efficace pour synthétiser des ynamides-SF_5 stables, permettant de nombreuses transformations régiosélectives et l'accès à une nouvelle bibliothèque de composés SF_5. Cette chimie du groupe SF_5 est en plein essor et de nombreuses évolutions sont encore à prévoir à très court terme, notamment dans la recherche d'alternatives aux PFAS où le SF_5 démontrera sans nul doute son utilité.

Les auteurs remercient chaleureusement les Dr. Karinne Miqueu, Dominique Cahard et Christophe Meyer avec qui ils ont développé ces projets, ainsi que les doctorants et postdoctorants qui ont participé à ces travaux.

[1] J.-U. Peters *et al.*, Can we discover pharmacological promiscuity early in the drug discovery process?, *Drug Discov. Today*, **2012**, *17*, p. 325-35, https://doi.org/10.1016/j.drudis.2012.01.001
[2] Anses, PFAS : des substances chimiques très résistantes, 2025, www.anses.fr/fr/content/pfas-substances-chimiques-persistantes (consulté le 11/09/26).
[3] V. Bizet, L. Popek, D. Matchavariani, Fiche « Un point sur » n° 108 – Le SF_5 : un groupe fluoré à grand potentiel, *L'Act. Chim.*, **2023**, *488*, p. 59-60, https://new.societechimiquedefrance.fr/wp-content/uploads/woocommerce_uploads/2023/10/Bizet-HD-kyejjo.pdf
[4] M. Abd El Sater, L. Popek, N. Blanchard, V. Bizet, Recent advances in the chemistry and application of SF_5-compounds, *Synthesis*, **2025**, *57*, p. 1117-37, https://doi.org/10.1055/a-2383-6620
[5] T. M. Nguyen, F. René, V. Bizet, D. Cahard, Understanding the pentafluorosulfanyl group and property-driven design of SF_5-containing compounds, *Chem. Soc. Rev.*, **2026**, *55*, p. 1333-51, https://doi.org/10.1039/D5CS00566C
[6] M. Saccomanno *et al.*, Biodegradation of pentafluorosulfanyl-substituted aminophenol in *Pseudomonas* spp., *Biodegradation*, **2018**, *29*, p. 259-70, https://doi.org/10.1007/s10532-018-9827-z
[7] Y. Yang, L. Han, L. Brettnacher, L. Canavero, A. Tlili, Synthetic access to persulfuranyl scaffolds via direct and indirect methods, *Chem. Rev.*, **2025**, *125*, p. 8426-76, https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.5c00131
[8] L. Popek, T. M. Nguyen, N. Blanchard, D. Cahard, V. Bizet, Synthesis and further use of SF_5-alkynes as platforms for the design of more complex SF_5-containing products, *Tetrahedron*, **2022**, *117-118*, 132814, https://doi.org/10.1016/j.tet.2022.132814
[9] L. Popek *et al.*, Regio- and stereoselective hydroelementation of SF_5-alkynes and further functionalizations, *Angew. Chem. Int. Ed.*, **2023**, *62*, e202300685, https://doi.org/10.1002/anie.202300685
[10] L. Popek, M. Cihan, N. Blanchard, V. Bizet, Palladium-catalyzed regioselective synthesis of 2-SF_5-indenols and further derivatizations, *Angew. Chem. Int. Ed.*, **2024**, *63*, e202315909, https://doi.org/10.1002/anie.202315909
[11] L. Popek *et al.*, Synthesis of pentafluorosulfanylated ynamides and further functionalizations, *Org. Lett.*, **2024**, *26*, p. 10369-75, https://doi.org/10.1021/acs.orglett.4c03972
[12] W. Hoover, D. D. Coffman, Synthesis and chemistry of ethynylsulfur pentafluoride, *J. Org. Chem.*, **1964**, *29*, p. 3567-70, https://doi.org/10.1021/jo01035a030
[13] F. Z. Marques, M. A. Markus, B. J. Morris, Resveratrol: cellular actions of a potent naturalis chemical that confers a diversity of health benefits, *Int. J. Biochem. Cell Biol.*, **2009**, *41*, p. 2125-28, https://doi.org/10.1016/j.biocel.2009.06.003
[14] a) T. Kumon *et al.*, First practical synthesis of 2- or 3-fluoroalkylated indenols via cobalt-catalyzed [2 + 3] carbocyclization of fluorine-containing alkynes and 2-iodoaryl ketones, *Tetrahedron*, **2019**, *75*, p. 3713-21, https://doi.org/10.1016/j.tet.2019.05.042 ; b) T. Kumon *et al.*, Regioselective cobalt(II)-catalyzed [2 + 3] cycloaddition reaction of fluoroalkylated alkynes with 2-formylphenylboronic acids: easy access to 2-fluoroalkylated indenols, *Beilstein J. Org. Chem.*, **2020**, *16*, p. 2193-200, https://doi.org/10.3762/bjoc.16.184
[15] T. M. Nguyen *et al.*, Expanding radical chloropentafluorosulfanylation of alkynes, *Org. Lett.*, **2024**, *26*, p. 365-69, https://doi.org/10.1021/acs.orglett.3c04043

Lucas POPEK est postdoctorant au Technische Universität Braunschweig (Institut für Organische Chemie, Braunschweig, Allemagne). Il a effectué sa thèse au Laboratoire LIMA et a été lauréat du ***Prix de thèse Henri Kagan décerné par la division Chimie Organique (DCO) de la Société Chimique de France en 2025***.



Nouveaux principes actifs pharmaceutiques

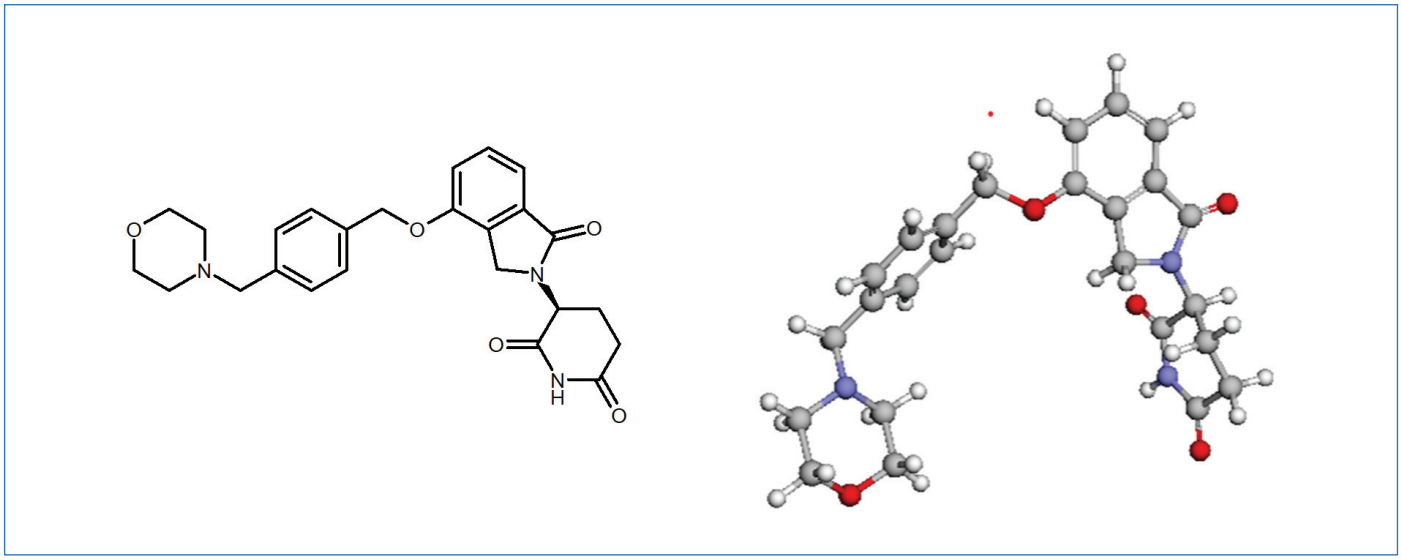
Bilan des approbations FDA en juillet-août 2026

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

Molécules de synthèse

Principe actif	Compagnie	Indication
Gedatolisib	Celcuity	Cancer du sein
Enlicitide decanoate	MSD	Hypercholestérolémie élevée
Zidesamtinib	Nuvalent	Cancer du poumon à non petites cellules
Centanafadine hydrochloride	Otsuka Pharmaceutical Co Ltd	Déficit de l'attention
Oveporexton	Takeda Pharms USA	Narcolepsie
Florquinitau F-18	Cerveau Lantheus	Imagerie PET
Iberdomide hydrochloride	Bristol Myers Squibb	Myélome multiple
Daraxonrasib	Revolution Medicines Inc	Cancer du pancréas
Rusfertide acetate	Takeda Pharmaceuticals U.S.A., Inc.	Polyglobulie essentielle

Le ***gedatolisib*** est utilisé dans le traitement du cancer du sein. C'est un inhibiteur de kinase ; son mécanisme d'action repose sur la liaison aux différentes isoformes de la sous-unité catalytique p110 de la PI-3K qui est une enzyme permettant la transformation des phosphoinositides en phosphatidylinositol-3-phosphate. La voie de signalisation PI3K/AKT/mTOR est une voie de signalisation intracellulaire importante dans la régulation du cycle cellulaire.
L'***enlicitide*** sous forme de décanoate est utilisé pour traiter l'hypercholestérolémie sévère. C'est un peptide macrocyclique administrable par voie orale, qui agit comme inhibiteur de la proprotéine convertase subtilisine/kexine de type 9 (PCSK9).
Le ***zidesamtinib*** est indiqué dans le traitement des adultes atteints d'un cancer du poumon non à petites cellules, localement avancé ou métastatique, positif pour ROS1, ayant déjà reçu un inhibiteur de la kinase ROS1. Le zidesamtinib est un inhibiteur de kinase qui agit en bloquant ROS1, une protéine anormale qui favorise la croissance de certains cancers du poumon, y compris des formes devenues résistantes aux traitements ciblant ROS1 utilisés précédemment.
La ***centanafadine*** est utilisée dans le traitement du trouble du déficit de l'attention avec ou sans hyperactivité (TDAH). Cette molécule est un inhibiteur de la recapture de la sérotonine, de la noradrénaline et de la dopamine (SNDRI), avec une affinité plus marquée pour la noradrénaline, suivie de la dopamine et enfin de la sérotonine, et il exerce des effets stimulants.
L'***oveporexton*** est utilisé dans le traitement de la narcolepsie de type 1, qui est un trouble neuropsychiatrique rare du sommeil persistant tout au long de la vie. Elle est causée par la perte de cellules cérébrales produisant l'orexine, un messager chimique qui régule l'éveil, le sommeil et le tonus musculaire. L'oveporexton est un agoniste des récepteurs OX2 de l'orexine. Il est en attente de classement parmi les substances réglementées en vertu de la loi sur les substances contrôlées (« *Controlled Substances Act* »).
Le ***florquinitau (18F)*** est un agent de diagnostic radioactif utilisé pour l'imagerie par tomographie par émission de positons (TEP ou PET). Il est indiqué pour l'examen du cerveau chez les adultes atteints de troubles cognitifs qui seraient dus à la maladie d'Alzheimer afin de vérifier la présence éventuelle d'une pathologie de l'enchevêtrement neurofibrillaire tau (NFT).
L'***iberdomide***, un dérivé de la thalidomide, est un médicament anticancéreux approuvé pour le traitement du myélome multiple. Il favorise la dégradation de protéines modulatrices du céréblon, une protéine humaine qui forme un complexe d'ubiquitine ligase servant à cibler certaines protéines pour les détruire. L'iberdomide est indiqué en association avec le daratumumab, l'hyaluronidase et la dexaméthasone pour le traitement des adultes atteints de myélome multiple qui ont reçu au moins une ligne de traitement antérieure comprenant un inhibiteur du protéasome et un agent immunomodulateur. Le dossier déposé a obtenu les désignations « *priority review* », « *breakthrough therapy* » et « *orphan drug* ».
Le ***daraxonrasib***, une petite molécule macrocyclique, est un inhibiteur des protéines Ras. Il se lie d'abord à la cyclophiline A, puis le complexe formé se lie à la protéine Ras. Les protéines Ras sont une famille de protéines qui ont un rôle protooncogène. Considéré généralement comme un traitement révolutionnaire contre le cancer du pancréas, il bénéficie à la FDA du statut de « *breakthrough therapy* ». En effet, des essais cliniques de phase III ont montré une durée médiane de survie des patients métastasés de 13,2 mois comparée à une survie de 6,7 mois avec la chimiothérapie standard.
Le ***rusfertide*** est le premier traitement approuvé de la polyglobulie essentielle. Il s'agit d'un mimétique de l'hepcidine, une hormone qui régule naturellement le fer dans l'organisme. La polyglobulie essentielle, ou maladie de Vaquez, est un syndrome myéloprolifératif, caractérisé par une polyglobulie (augmentation importante de l'hémoglobine) avec une augmentation de l'hématocrite, du nombre de globules rouges et du volume globulaire total.



Structure de l'iberdomide. Nomenclature : ((3S)-3-[4-({4-[(morpholin-4-yl)methyl]phenyl}methoxy)-1-oxo-2,3-dihydro-1H-isoindol-2-yl]piperidine-2,6-dione ; n° CAS : 1323403-33-3. La représentation 3D provient du site Drugbank[1] : https://go.drugbank.com/structures/small_molecule_drugs/DB12101

Molécules d'origine biologique

Principe actif	Type de molécule	Compagnie	Indication
Atacicept-vymj	Protéine de fusion	Vera Therapeutics Inc.	Protéinurie
Bevacizumab-vikg	Anticorps monoclonal	Outlook Therapeutics Inc.	DMLA
Garetosmab-grts	Anticorps monoclonal	Regeneron Pharmaceuticals Inc	Fibrodysplasie ossifiante progressive

L'***atacicept*** est une glycoprotéine de fusion recombinante humaine qui cible le stimulateur des lymphocytes B (BLyS) ainsi que le ligand induisant la prolifération (APRIL). Il a obtenu la désignation « *fast track* » pour l'étude de la réduction de la protéinurie chez les adultes atteints de néphropathie à immunoglobulines A (IgAN) primitive, présentant un risque de progression de la maladie.

Le ***bévacizumab*** est un inhibiteur du facteur de croissance endothélial vasculaire (VEGF) déjà approuvé pour le traitement de certains cancers avancés ou métastatiques. Cette approbation est la première et la seule formulation ophtalmique du bévacizumab pour le traitement de la dégénérescence maculaire liée à l'âge (DMLA) néovasculaire (forme « humide »).

Le ***garetosmab*** est le premier et le seul traitement approuvé ayant démontré une réduction de l'apparition de nouvelles lésions d'ossification chez des adultes atteints de fibrodysplasie ossifiante progressive. Il agit par inhibition de la signalisation de l'activine, en ciblant l'activine A. La fibrodysplasie ossifiante progressive (FOP), appelée également myosite ossifiante progressive ou maladie de l'homme de pierre, se caractérise par une ossification progressive des muscles squelettiques et des tendons qui les rattachent aux os, le plus souvent précédée de poussées inflammatoires. Cette maladie génétique résulte de la mutation du gène ACVR1. La FDA a accordé au dossier du garetosmab les désignations de « *breakthrough therapy* », « *fast track* », « *orphan drug* » et « *priority review* ».

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

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

La chimie s'invite sur les routes de France

Marie-Claude VITORGE

Correspondante de la SCF pour Chimie et Société.
✉ mcvitorge@gmail.com

« *La chimie est une aventure intellectuelle, humaine et collective* », Andrée Marquet.

La commission Chimie et Société a été fondée en 2001 au sein de la Fondation Internationale de la Maison de la Chimie par Andrée Marquet, récemment disparue, pour œuvrer vers un dialogue constructif science-société [1]. Depuis le début, la Société Chimique de France est impliquée dans les diverses manifestations organisées par Chimie et Société, et notamment dans les rencontres « Chimie & Terroir » destinées aux élèves et au grand public [2]. La carte d'identité de ces rencontres est le choix de villes-hôtes éloignées des grands centres de recherche universitaire et l'illustration de la chimie à partir des ressources locales.
Cet article témoigne des événements organisés par la commission en 2026 et vous invite à découvrir ceux qui se préparent pour 2027.

Chimie & Terroir à Mont-de-Marsan (Landes), lycée Robert Wlérick, 28-30 mai 2026

Pour la seizième édition de ces rencontres [3], nous avons eu très chaud ! Début de la canicule avec un gymnase dont la température atteignait 38,5 °C et qui nous a obligés à annuler l'atelier de fabrication du beurre !
Néanmoins, durant les deux journées dédiées aux scolaires, jeudi et vendredi, les 611 élèves et les 50 enseignants qui les accompagnaient, venus pour certains en car avec 1 h 30 de trajet, ont montré beaucoup d'enthousiasme devant les 17 démonstrations et les cinq ateliers.
Le samedi ouvert au public a connu une petite fréquentation, mais certaines personnes sont restées près de 4 h pour tout voir et essayer de tout comprendre.



Le spectacle des *Farces moléculaires d'Ernestte pour l'anniversaire de Barnab'* a enthousiasmé 70 jeunes, fascinés par les expériences colorées des deux comédiennes des Chimifous.
D'autre part, le jeudi soir, deux mini-conférences ont été données dans la salle du Conseil Départemental :
- « La place des femmes en science », par Françoise Conan
- « Il y a un chimiste dans ma cuisine », par Ludovic Paquin

Nous remercions le lycée Robert Wlérick pour l'accueil dans son gymnase, le CCSTI Lacq-Odyssée pour son aide et le Conseil Départemental des Landes pour son accompagnement et l'aide au transport des collégiens. Merci également à la Société Chimique de France pour son soutien fidèle,

Les démonstrations [4]
- L'huître est une chimiste hors pair ! Une histoire de coquilles et de perles
- Cuir de poisson
- L'arbre et la chimie. Du papier plus blanc que blanc
- Bois et CO_2. Cycle de carbone
- Le bois et l'enzyme
- La résine de pin, source de terpènes
- Cristallisation du sel
- L'ozone. Dr Jekyll et Mr Hyde
- Quand le vivant s'illumine : mystères de la lumière des êtres vivants
- Algues magiques
- Voyage au cœur de la couleur
- Photographie d'hier et d'aujourd'hui
- Le bleu du photographe
- Landes terre de sport. Glisse et rebonds
- L'eau d'ici, l'eau de là. Le goût des ions
- À la découverte du collage du bois avec une colle issue des arbres
- Escape Game : À l'aide, mon expérience s'emballe !

Les ateliers
- Je gonfle un ballon sans souffler. Je prépare de la mousse de Schtroumpf
- De quelle couleur est mon feutre ? Je sépare les couleurs de M&M's
- Je compose un arc en ciel de couleurs
- Je lave l'eau de Cologne
- Sucré ou pas sucré ?

Les stands *à l'entrée du gymnase pour informer les enseignants et le public*
- La Société Chimique de France
- Les métiers de la recherche au CNRS
- Formation : universités, écoles et centres de recherche
- Chimie et Société, Fondation de la Maison de la Chimie

Exposition
- Regard sur la Chimie

à la Fondation de la Maison de la Chimie et à l'IPREM-CNRS-UPPA.
Et un grand merci à Jean-Marc Sotiropoulos, chercheur au CNRS et président de Chimie et Société Sud Nouvelle-Aquitaine, et son équipe pour l'organisation de cette édition.
Rendez-vous en 2027 en Corse pour de nouvelles aventures.

Week-end grand public à l'occasion du congrès de la Société Chimique de France, Bordeaux, Cap Sciences, 20-21 juin 2026

À nouveau en période de canicule, 43 °C à Bordeaux… mais heureusement le CCSTI Cap Sciences était climatisé !
Après Lille, Montpellier et Nantes, Chimie et Société a coanimé ce week-end grand public sur le thème « Entre terre et Océan : la chimie qui façonne notre région » à Bordeaux en tenant sept stands.
Malgré les fortes chaleurs qui ont perturbé le congrès les jours suivants, 112 personnes sont venues à notre rencontre le samedi et 180 le dimanche. Grands et petits ont découvert de nouveaux aspects de la chimie et ont montré un grand intérêt pour ces démonstrations.
Conférences, table ronde, expositions et ateliers participatifs pour petits et grands ont abordé notamment les thématiques de la qualité et la pollution de l'eau, la pollution par les microplastiques, la chimie biosourcée ainsi que la chimie du bois et du vin. L'exposition *Regards sur la chimie* était aussi présente. *Les farces moléculaires d'Ernestte pour l'anniversaire de Barnab'* ont également eu un grand succès.



Françoise Conan pour Femmes et Sciences et Jean-Marc Sotiropoulos (« Les secrets des plantes médicinales : quand la chimie se met au vert ») ont animé deux des six mini-conférences proposées sur des thèmes régionaux.
Les stands d'information ont permis au grand public de découvrir la Société Chimique de France et Chimie et Société.
Merci à Jacinthe Gamon et Joëlle Mascetti, chercheuses respectivement à l'Institut de Chimie de la Matière condensée et à l'Institut des Sciences Moléculaires à Bordeaux, pour la logistique, ainsi qu'à l'équipe de Cap Sciences.

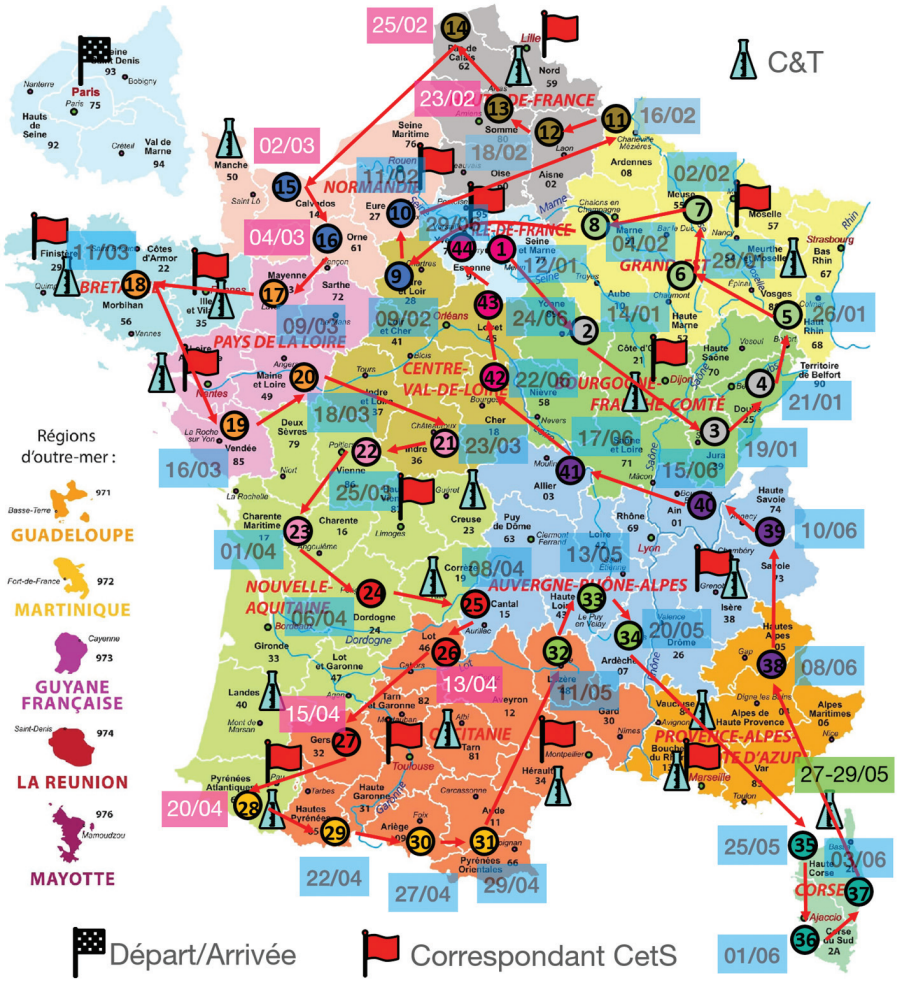
Stands de Chimie et Société	***Autres stands SCF, RJ-SCF et partenaires***
• L'huître est une chimiste hors pair • L'algue dans tous ses états • Cuirs insolites • Des diatomées au verre • Cristallisation du sel • L'arbre et la chimie. Du papier plus blanc que blanc • Les métiers de la recherche au CNRS • Chimie et Société	• Chimie bioinspirée, photosynthèse, rôle des arbres, plastique biosourcé, arômes du vin • Jeu Kimik • Molécules en réalité virtuelle • Fabrication d'un plastique biosourcé • Sur la piste des microplastiques • Femmes et Sciences, Société Chimique de France, métiers et entreprises de la chimie…

Une aventure pour 2027 : le tour de France de la chimie avec *Chimistes sur les routes*

La Fondation de la Maison de la Chimie a confié l'organisation de ce projet ambitieux à sa commission Chimie et Société.
Du 2 janvier au 30 juin 2027, les correspondants de Chimie et Société organiseront dans leurs régions des ateliers de découverte de la chimie pour des classes du CE2 au CM2 dans des écoles ou centres de loisirs en zone rurale pendant trois à quatre semaines chacun.
Chimistes sur les routes sera inauguré à la Maison de la Chimie à Paris et suivra l'itinéraire présenté sur la carte (p. 50), dont l'ordre et les dates des étapes sont en cours de validation.
Chaque correspondant fera appel aux chercheurs, enseignants-chercheurs, doctorants, postdoctorants, ingénieurs et techniciens de sa région tentés par cette aventure.
Chimie et Société a recruté une chargée de mission qui assurera la logistique générale et aidera les correspondants régionaux dans leurs démarches administratives.
La Corse accueillera trois étapes et les rencontres Chimie & Terroir 2027.

[1] www.chimieetsociete.org
[2] www.chimieetsociete.org/chimie-et-terroir/a-propos-de-chimie-terroir.html
[3] M.-C. Vitorge, Chimie & Terroir : retour sur les quinze éditions, *L'Act. Chim.*, **2025**, *505*, p. 46-47.
[4] Posters des démonstrations et des ateliers : www.chimieetsociete.org/images/stories/mont_de_marsan_2026/CT26_Fascicule_posters.pdf

Ateliers de découverte de la chimie	
• Je gonfle un ballon sans souffler. Je prépare de la mousse de Schtroumpf. Produire du gaz par une réaction chimique • De quelle couleur est mon feutre ? Je sépare les colorants des M&M's. Composition et décomposition de la lumière, chromatographie • Je compose un arc-en-ciel de couleurs. Pourquoi le jus de chou rouge change-t-il de couleur quand j'ajoute du savon ? • Je lave l'eau de Cologne. Rencontre troublante de l'eau de Cologne, de l'eau et du savon	• Je fabrique du beurre : viens baratter pour comprendre ce qu'il se passe quand la crème devient beurre • Sucré ou pas sucré ? Apprends à différencier les aliments sucrés *En alternance, un* ***atelier enquête*** *ou un* ***spectacle*** *pour les CP à CE1* • Le mystère de la lettre anonyme • *Les farces moléculaires d'Ernestte pour l'anniversaire de Barnab'* par les Chimifous



Carte prévisionnelle du trajet et des étapes de *Chimistes sur les routes*.

MATINÉE HOMMAGE À



Andrée Marquet

1934 – 2026

Vie, œuvre et héritage

VENDREDI
4 DÉCEMBRE 2026 **9 h - 14 h**

Fondation de la maison de la chimie
28 bis, rue Saint-Dominique, 75007 Paris

8h30-9h00	**Accueil Café**
9h00-9h10	**Ouverture**
	Lydie Valade, Chimie et Société - Fondation de la Maison de la Chimie
9h10-9h40	**L'engagement en médiation**
	Richard-Emmanuel Eastes, Haute école spécialisée de Suisse Occidentale (HES-SO) et SEGALLIS
9h40-10h10	**L'investissement pour la communauté**
	Sandrine Sagan, CNRS **Olivier Lequin**, Sorbonne Université **Janine Cossy**, Académie des Sciences **Gilberte Chambaud**, Société chimique de France
10h15-12h15	**L'héritage scientifique et l'enseignement**
	Laurent Devel, CEA, Laboratoire de Biologie Chimique **Myriam Seemann**, CNRS, Institut de Chimie de Strasbourg **Fabrice Viviani**, Oncodesign **Jérôme Fagart**, Polytechnique **Jean-Pierre Genêt**, Chimie ParisTech-PSL
12h15-12h25	**La science par la danse**
	Sabine Lewartowski, Association Le Creuset
12h30-12h45	**Clôture**
	Dominique Guianvarc'h, Université Paris Saclay **Philippe Karoyan**, Sorbonne Université
12h45-14h00	**Cocktail**

Pionnière de la chimie bio-organique, membre correspondante de l'Académie des sciences, Andrée Marquet (1934-2026) a ouvert la voie à de nombreux chercheuses et chercheurs et fondé Chimie et Société pour œuvrer vers un dialogue constructif science-société.
Nous vous invitons à vous joindre à la matinée qui retracera son parcours exemplaire d'engagement au service de la communauté et de la transmission des savoirs.

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

• **Inscription gratuite obligatoire :** www.eventbrite.com/e/matinee-hommage-a-andree-marquet-tickets-2003770466405?aff=oddtdtcreator

Distinctions

Grand Prix 2026 de la Fondation de la Maison de la Chimie

Le Grand Prix de la Fondation est destiné à récompenser une œuvre originale concernant la chimie, au bénéfice de l'homme, de la vie, de la société ou de la nature. Créé en 1986, il est décerné tous les deux ans.

Les Prix 2026 ont été attribués à deux figures majeures de l'électrochimie. Leur remise aura lieu le 3 février 2027 à la Maison de la Chimie à Paris, lors d'une séance solennelle. À cette occasion, les lauréats seront invités à présenter leurs travaux.

• Pour en savoir plus : https://fondation.maisondelachimie.com/les-actions/les-prix-de-la-fondation/grand-prix-de-la-fondation/les-laureats-de-lannee



• Christian Amatore

Christian Amatore est directeur de recherche émérite du CNRS à l'École Normale Supérieure (ENS Paris) et professeur émérite (« *Distinguished Professor* ») à l'Université de Xiamen (Chine).

Pionnier de l'électrochimie moléculaire, il entre au CNRS en 1975 et soutient son doctorat d'État à l'Université Paris Diderot en 1979. Devenu directeur de recherche en 1984, il fonde l'unité de recherche « Processus d'activation sélectif par transfert d'énergie uni-électronique ou radiatif » (ENS - CNRS - Université Pierre et Marie Curie), dont il sera le directeur jusqu'en 2010. Son travail a fait évoluer l'électrochimie d'une discipline surtout centrée sur des réactions aux électrodes vers une science analytique polyvalente, capable d'explorer des systèmes biologiques complexes à l'échelle cellulaire et même subcellulaire. Ses publications et ses méthodes ont influencé des générations de chercheurs en électrochimie, en chimie analytique et bio-analytique, en synthèse organique avec l'élucidation de mécanismes réactionnels, des applications en catalyse, en physicochimie, en nanosciences, neurosciences avec en particulier une compréhension approfondie de la neurotransmission. Cette influence se fait aujourd'hui ressentir bien au-delà de l'électrochimie : ses travaux ont de fait permis de remodeler des concepts fondamentaux aussi bien en synthèse organique, chimie physique, biologie cellulaire ou encore en nanomédecine. Associé au professeur Mark Wightman, Christian Amatore a par ailleurs joué un rôle pionnier dans le développement des ultramicroélectrodes, puis des nanoélectrodes. Membre de l'Académie des sciences française et d'autres pays, il a vu son travail honoré par de nombreuses distinctions, notamment la Médaille d'argent du CNRS 1993, la Médaille Lavoisier 2018 de la Société Chimique de France et la Médaille d'or de l'International Society of Electrochemistry. Fait chevalier de l'Ordre national du mérite puis chevalier de la Légion d'honneur par l'État français, Christian Amatore est également membre du conseil scientifique conseillant l'UNESCO pour le Programme des sciences fondamentales.

• Voir aussi : Christian Amatore, une vie de chimiste guidée par la curiosité, CNRS Chimie, 22/10/**2026**, www.inc.cnrs.fr/fr/cnrsinfo/christian-amatore-une-vie-de-chimiste-guidee-par-la-curiosite



• Jean-Marie Tarascon

Spécialiste en chimie des solides, Jean-Marie Tarascon est professeur au Collège de France, où il occupe la chaire Chimie du solide et énergie.

Titulaire d'une centaine de brevets, il s'est affirmé comme une figure incontournable de la recherche sur les batteries, ayant joué un rôle majeur dans le développement des batteries au lithium. Dès son postdoctorat, au sein du Bell Labs (Nokia, E.-U.), il améliore l'efficacité des batteries lithium-ion en substituant à l'électrode à base de cobalt une électrode à base de manganèse, puis invente et développe les premières batteries flexibles en plastique, une technologie qui permet aux batteries lithium-ion d'équiper des véhicules électriques et des smartphones. Après ces débuts brillants, Jean-Marie Tarascon est directement recruté en tant que professeur de classe exceptionnelle au sein du Laboratoire des matériaux d'Amiens. Il y mène des recherches sur des technologies avancées pour le développement des batteries, en s'engageant notamment pour le développement de procédés de synthèse soucieux de l'environnement et de nouveaux matériaux d'électrodes à capacité exacerbée. Il s'intéresse aux nouveaux mécanismes réactionnels et à l'exploration de nouvelles technologies de batteries au-delà du Li-ion, notamment les technologies Na-ion et Zn-MnO_2. Jean-Marie Tarascon a par ailleurs participé au développement de la recherche sur les batteries en créant des ponts entre recherche et industrie, notamment à travers le réseau européen Alistore, créé en 2004, puis la mise en place, à l'échelle hexagonale, du Réseau sur le stockage électrochimique de l'énergie (RS2E), créé en 2010.

Membre honoraire 2002 de l'Institut universitaire de France au sein de la chaire Matériaux pour le stockage de l'énergie et de l'Académie des sciences, Jean-Marie Tarascon a reçu de nombreuses récompenses prestigieuses, dont la Médaille de l'innovation 2017 et la Médaille d'or 2022 du CNRS, ainsi que le Grand Prix Pierre Süe 2011 et la Médaille Lavoisier 2022 de la Société Chimique de France. Il a également été élevé au grade d'officier de l'Ordre national du mérite.

Prix de l'Académie des sciences 2026

Grâce à des donateurs privés, organismes d'État et entreprises, l'Académie des sciences remet chaque année près de 80 prix couvrant l'ensemble des domaines scientifiques, aussi bien fondamentaux qu'appliqués. Tous ces prix sont remis aux lauréats au cours de deux séances solennelles sous la coupole de l'Institut de France.

Parmi les lauréats dévoilés lors de la séance du 27 octobre, les chimistes suivants ont été distingués. La 2e séance aura lieu le 24 novembre.

• Crédits photos : ©Académie des sciences/Mathieu Baumer.

Pour en savoir plus :

Retour en images sur la cérémonie et lien vidéo : www.academie-sciences.fr/retour-en-images-premiere-seance-solennelle-de-remise-des-prix-de-lacademie-des-sciences-2026

Plaquette de présentation téléchargeable sur : www.academie-sciences.fr/prix



• Hervé This, Médaille de la section Chimie

Diplômé de l'École supérieure de physique et chimie industrielles de la ville de Paris, Hervé This soutient en 1996 une thèse de physico-chimie des matériaux, consacrée à la gastronomie moléculaire et physique qu'il a créée en 1988. S'ensuit une carrière au sein de l'INRAE, où il dirige aujourd'hui l'INRAE-AgroParisTech International Centre of Molecular and Physical Gastronomy (ICMPG), en sus d'une activité de chargé de mission à l'INRAE et de professeur consultant à AgroParisTech. Ses recherches portent principalement sur les mécanismes d'échanges entre un système physicochimique (tel un « aliment ») et son environnement (généralement liquide). Il est ainsi conduit à explorer la physicochimie des systèmes dispersés, notamment les colloïdes. Il a introduit un formalisme (NDSF) permettant d'étudier ces systèmes selon un degré de complexité croissant et d'en mieux comprendre la structure et les propriétés.

Parallèlement à ses recherches, il s'est engagé dans de nombreuses activités de développement et de valorisation de la gastronomie moléculaire et physique. Il a notamment créé, en 2014, l'*International Journal of Molecular and Physical Gastronomy*.

Membre de l'Académie d'agriculture de France, de l'Académie royale des sciences, arts et lettres de Belgique, et de l'Académie des sciences, des lettres et des arts d'Alsace, Hervé This a notamment reçu le Prix Sonning de l'Université de Copenhague pour ses réalisations culturelles en 2025 et il été élevé au grade d'officier dans l'Ordre de la Légion d'honneur, de commandeur dans l'Ordre du mérite agricole, d'officier dans l'Ordre des Arts et Lettres et dans l'Ordre des Palmes académiques.



• Zacharias Amara, subvention de la Fondation Simone et Cino Del Luca

Après une thèse en chimie organique soutenue en 2012 à l'Université Paris-Sud et deux postdoctorats, Zacharias Amara est recruté en 2015 au CNAM dans le laboratoire Génomique, bioinformatique et chimie moléculaire (GBMC, Paris), où il poursuit aujourd'hui sa carrière comme maître de conférences. Ses travaux portent notamment sur le développement de nouvelles stratégies de photocatalyse et sur l'influence de l'organisation moléculaire sur la photoréactivité. Les plus récents d'entre eux s'intéressent à des systèmes bio-inspirés et multichromophoriques, afin de mieux comprendre et contrôler les interactions entre les molécules photoactives et leur conversion de l'énergie lumineuse en transformations chimiques plus durables.

Lauréat en 2017 d'un *Ignition Grant Award* de l'ACS Green Chemistry Institute pour la conception de systèmes photocatalytiques hétérogènes et d'un financement, en 2018, de la Bill & Melinda Gates Foundation pour la mise au point de nouvelles voies de synthèse de l'artémisinine, il a reçu en 2023 le prix Jean Normant de la division Chimie Organique de la SCF et est membre junior de l'Institut universitaire de France depuis 2024. Soucieux de développer une chimie durable, Amara a co-créé, en 2023, la start-up Linium BioChemicals[(1)], qui s'engage dans une chimie plus verte à travers la valorisation d'un biopolymère, la lignine.

[(1)] https://liniumbio.com



• Svetlana Mintova, prix Arkema/Académie des sciences de l'innovation en chimie des matériaux durables

Après une thèse en chimie physique réalisée à l'Université de Sofia (Bulgarie) et un passage à Munich, Mintova Svetlana rejoint la France en 2006 en tant que chargée de recherche. D'abord recrutée au sein du Laboratoire de matériaux à porosité contrôlée de Mulhouse, elle intègre le Laboratoire de catalyse et spectrochimie (LCS) de l'EnsiCaen en 2009 en tant que directrice de recherche. Depuis 2021, elle dirige le Centre des zéolithes et des matériaux nanoporeux (CLEARrn), rattaché au LCS.

Ses travaux ont contribué à la conception rationnelle de matériaux nanoporeux, notamment de nanozéolithes, en établissant des principes de contrôle de leurs structures et de leurs propriétés pour des applications durables en catalyse, séparation du CO_2, conversion énergétique et biomédecine. Ses découvertes ont favorisé l'innovation *via* des partenariats industriels, des brevets et des transferts technologiques, dans un décloisonnement entre recherche et industrie au cœur du projet du CLEARrn.

Ancienne présidente de l'*International Zeolithe Association* et de l'*European Zeolithe Association*, Svetlana Mintova a vu ses travaux récompensés par de multiples distinctions en France et à l'international. Elle a notamment reçu le *Flaningen Award* 2024 et été promue chevalier à l'Ordre national du mérite en 2025.



• Laurence Mulard, prix Léon Velluz

Directrice de recherche à l'Institut Pasteur, Laurence Mulard dirige l'unité Chimie des biomolécules de l'unité mixte de recherche Chimie biologique pour le vivant (Chem4Life, Paris). Avec son équipe, elle s'intéresse aux sucres microbiens et à leurs applications à des fins vaccinales, thérapeutiques ou de diagnostic. Combinant approches moléculaires et recherche translationnelle, dont des essais en phase clinique, ces travaux portent notamment sur le développement de candidats-vaccins originaux, fondés sur l'emploi de sucres de synthèse, contre les infections diarrhéiques causées par les bactéries du genre *Shigella*. Plus généralement, les recherches de Laurence Mulard contribuent à ouvrir de nouvelles voies pour la prévention et le traitement des infections d'origine bactérienne.



• Chantal Pichon, prix Seqens de l'Académie des sciences et Médaille Berthelot

Professeure de biologie moléculaire et cellulaire à l'Université d'Orléans, directrice du laboratoire Thérapies innovantes et nanomédecine (InTheRNA/ARNm) au CHU d'Orléans, Chantal Pichon mène des

recherches à l'interface de la chimie, de la biologie et de la physique, en établissant un lien étroit entre recherche fondamentale et translationnelle. Après la soutenance de sa thèse en biologie cellulaire et microbiologie à Aix-Marseille Université en 1991, elle réalise un postdoctorat à Cambridge avant d'être recrutée à Orléans. La chercheuse est aujourd'hui internationalement reconnue dans le domaine de la délivrance des acides nucléiques, notamment de l'ARN messager (ARNm) à visée vaccinale et thérapeutique. Ses travaux ouvrent de nouvelles perspectives pour le développement de solutions thérapeutiques et vaccinales innovantes.

Parallèlement, Chantal Pichon s'est investie dans la DeepTech. Elle a notamment participé à la création de bYoRNA[1-2], une entreprise qui utilise sa technologie brevetée de bioproduction d'ARNm où la levure devient usine cellulaire pour produire des ARNm à grande échelle et d'une manière écoresponsable, dans l'objectif de lutter contre les cancers et les maladies rares.

Titulaire de la Chaire d'excellence en innovation à l'Institut universitaire de France, Chantal Pichon a été nommée à l'Académie des technologies en 2025 et est devenue chevalier de l'Ordre du mérite en juin dernier.

(1) M. Guibal, Qui est Chantal Pichon, la spécialiste de l'ARN messager, reconnue dans le monde entier ?, *La République du Centre*, 14 août **2025**, www.larep.fr/orleans-45000/actualites/qui-est-chantal-pichon-la-specialiste-de-l-arn-messager-reconnue-dans-le-monde-entier_14716814

(2) www.byorna.bio/fr



• Jean-Cyrille Hierso, prix Minafin

Après avoir soutenu en 1997 une thèse dans les domaines de la chimie de coordination, de l'élaboration des matériaux fonctionnels et de la catalyse à l'Université de Toulouse, Jean-Cyrille Hierso a intégré l'Université de Bourgogne, dont il dirige depuis 2009 l'Institut de chimie moléculaire (ICMUB). Ses travaux portent sur la compréhension et la maîtrise des interactions moléculaires qui gouvernent la réactivité des métaux, afin de concevoir de nouveaux catalyseurs, matériaux fonctionnels et nanotechnologies innovantes, au service d'une chimie plus durable. Il s'intéresse notamment à la fonctionnalisation organométallique et au stockage de l'hydrogène, deux domaines aux enjeux majeurs dans le cadre de la transition énergétique.

Jean-Cyrille Hierso est membre de l'Institut universitaire de France et a reçu le prix 2011 de la division Chimie de Coordination de la SCF.



• Nicolas Giuseppone, prix Fédération Gay-Lussac

Professeur à l'Université de Strasbourg et directeur de l'équipe « Synthèse et auto-assemblage moléculaires et supramoléculaires » (SAMS) à l'Institut Charles Sadron, Nicolas Giuseppone développe des recherches dans le domaine de la chimie supramoléculaire et des machines moléculaires, aux interfaces avec les nanosciences et la science des matériaux. Après avoir soutenu une thèse consacrée à la catalyse asymétrique en 2000, il a réalisé un postdoctorat aux États-Unis autour de la synthèse totale, puis a été recruté en tant que chargé de recherche CNRS à Strasbourg. Ses travaux visent à concevoir de nouveaux systèmes synthétiques actifs, capables de mimer certaines propriétés du vivant en fonctionnant hors équilibre thermodynamique, de manière à accéder à des matériaux intelligents pouvant s'adapter à leur environnement.

Ancien directeur de la Fédération de recherche sur les matériaux et les nanosciences de la région Grand Est (2018-2023), il a reçu de nombreux prix scientifiques. Nommé membre junior de l'Institut universitaire de France en 2013 et membre senior en 2023, Nicolas Giuseppone a notamment obtenu la Médaille d'argent du CNRS 2024, le prix Henry Le Chatelier 2024 du groupe thématique Chimie Supramoléculaire et le prix de la division Chimie Organique (DCO) 2025 de la SCF, ainsi que le prix international Sauvage-Stoddart-Feringa Senior en septembre dernier.



• Grégory Pieters, prix du Docteur Henri Labbé et Mme Henri Labbé

Après un doctorat en chimie organique soutenu à l'Université Versailles Saint-Quentin-en-Yvelines en 2010, Grégory Pieters a poursuivi sa carrière en chimie organique. Il est maintenant directeur de recherche au CEA Paris-Saclay Institut des sciences du vivant Frédéric Joliot. Avec son équipe du Service de chimie bioorganique et de marquage du CEA Paris-Saclay, il développe des méthodologies permettant d'incorporer, en une seule étape de synthèse, des isotopes de l'hydrogène (deutérium et tritium) dans des molécules complexes telles que des principes actifs ou des matériaux organiques. Il conçoit et étudie également des molécules luminescentes émettrices de lumière circulairement polarisée.



• Alexander Kuhn, prix Joannidès

Après sa thèse en électrochimie, soutenue en 1994 à Bordeaux, Alexander Kuhn réalise un postdoctorat à l'Institut technologique de Californie avant de rejoindre l'École nationale supérieure de chimie, de biologie et de physique (ENSCPB) de Bordeaux. Professeur à l'Institut polytechnique de Bordeaux, il mène des recherches dans le domaine de l'électrochimie, et plus particulièrement de l'électrochimie bipolaire. Ses travaux portent notamment sur le développement de systèmes analytiques, de photocatalyseurs et de nouveaux concepts permettant d'explorer des phénomènes fondamentaux tels que la chiralité. Ces recherches trouvent des applications dans des domaines variés, allant de la médecine à la transformation et au stockage de l'énergie.

Membre de l'Institut des sciences moléculaires et membre senior de l'Institut universitaire de France promotion 2013 et 2025, Alexandre Kuhn a reçu de nombreux prix pour ses recherches. Il a notamment été honoré par la Médaille d'argent du CNRS 2023[1] et le Grand Prix Pierre Süe 2024 de la Société Chimique de France.

(1) E. Picaud, Alexander Kuhn, le chimiste qui casse les codes, *Le Journal du CNRS*, 26/04/**2024**, https://lejournal.cnrs.fr/articles/alexander-kuhn-le-chimiste-qui-casse-les-codes



• Patricia Melnyk, prix Charles Derhé

Après un doctorat en chimie organique soutenu à l'Université Paris VI, Patricia Melnyk a travaillé au sein d'une start-up spécialisée dans la santé avant de devenir professeure à la Faculté de pharmacie de Lille. Actuellement professeure des universités au Centre de Recherche Lille Neuroscience & Cognition (LilNCog), où elle dirige l'équipe « Lille Neuro&Chem », elle développe de nouvelles molécules destinées au traitement des maladies neurodégénératives, telles que les maladies d'Alzheimer et de Parkinson. Les recherches de son équipe visent à mieux comprendre et à bloquer les mécanismes responsables de ces pathologies, ainsi qu'à identifier de nouvelles cibles thérapeutiques, dans l'objectif de contribuer au développement de traitements plus efficaces.

Parallèlement à ses activités académiques, Patricia Melnyk a créé Alzprotect[(1)], une entreprise biopharmaceutique développant des candidats médicaments, de leur découverte jusqu'aux essais cliniques, pour le traitement de maladies neurodégénératives, notamment la maladie d'Alzheimer et la paralysie supranucléaire progressive. Elle a été distinguée par le Grand Prix Spécial de la Société des Sciences de Lille 2018.

(1) alzprotect.com



• Damien Laage, prix Philippe A. Guye

Directeur de recherche au CNRS, rattaché au laboratoire de Chimie physique et chimie du vivant (CPCV) de l'École Normale Supérieure (ENS), Damien Laage s'est spécialisé en chimie théorique, et dirige actuellement l'équipe qui y est consacrée au sein du CPCV.

Après une thèse soutenue en 2001, intitulée « Études théoriques de transferts de charge en solution », Damien Laage a intégré l'ENS en 2002 en tant que chargé de recherche CNRS, avant de passer directeur de recherche en 2014. Il étudie l'influence du milieu – eau, surface ou organisme vivant – dans lequel se déroule une réaction sur sa vitesse et son devenir. Ses travaux ont notamment renouvelé la compréhension de deux phénomènes fondamentaux : la manière dont les molécules d'eau se réorganisent et celle dont les protons se déplacent d'une molécule à l'autre. Pour explorer ces mécanismes, Damien Laage combine simulations numériques, intelligence artificielle et modèles théoriques. Ses recherches s'appliquent à des systèmes très variés, des enzymes aux électrodes, en passant par les aérosols atmosphériques et les processus qui pourraient être à l'origine de l'apparition de la vie. Il a reçu la Médaille de bronze du CNRS 2010.

• Nathalie Moncoffre, prix Paul Pascal

Directrice de recherche au CNRS, à l'Institut de physique des deux infinis de Lyon (IP2I Lyon), Nathalie Moncoffre étudie le comportement et l'évolution des matériaux utilisés dans le cycle électronucléaire, soumis à des conditions extrêmes



de température et d'irradiation. Elle dirige l'infrastructure de recherche « Étude des matériaux sous irradiation et analyse » (EMIR&A), dédiée à l'étude et à la caractérisation des matériaux irradiés à l'aide d'accélérateurs.

Ses travaux participent ainsi à une meilleure compréhension du vieillissement des matériaux et des enjeux de sûreté liés aux installations nucléaires.

Elle est également engagée dans les activités de l'Université ouverte Lyon 1, qui contribue à la diffusion et au partage de la culture scientifique auprès du grand public.

Industrie

Propositions de France Chimie pour 2027

France Chimie a publié un manifeste à destination des politiques dans lequel l'association des industriels de la chimie, qui alerte sur l'affaiblissement d'un secteur essentiel à l'économie française, présente 22 propositions pour permettre à ses entreprises de produire, d'investir et d'innover en France. Ces propositions visent à faire de l'industrie chimique française un fer de lance du renouveau industriel, dans un contexte de décrochage de la Chimie européenne face à la Chine. Le manifeste préconise notamment un soutien à la décarbonation, un renforcement de la souveraineté européenne face à la concurrence déloyale et une restauration de la compétitivité fiscale de la France.

• Pour en savoir plus : www.francechimie.fr/media/824/manifeste-elections-2027-france-chimie-web.pdf

Résultats mitigés du plan de soutien 2014-2020 à la compétitivité industrielle européenne

La Cour des comptes européenne a publié mi-octobre un rapport d'audit sur la priorité « Primauté industrielle » du plan Horizon 2020, programme de financement de la recherche et de l'innovation de l'Union européenne pour la période 2014-2020, destiné à accroître la compétitivité européenne. Dotée d'environ 17 milliards d'euros, cette priorité avait pour objectif de financer des mesures de recherche et d'innovation des entreprises, en particulier les PME. Les secteurs des nanotechnologies, des matériaux avancés ainsi que de la fabrication et transformation avancées étaient au cœur de ce plan d'investissement.

Le rapport souligne la difficulté du plan à atteindre ses objectifs en matière de capacité d'innovation et de performance économique. Il insiste sur la nécessité, pour les prochains volets d'Horizon Europe, de renforcer le transfert de technologies, le développement à grande échelle, de rationaliser le suivi des bénéficiaires, ainsi que d'améliorer l'évaluation de leur performance économique et leur capacité d'innovation.

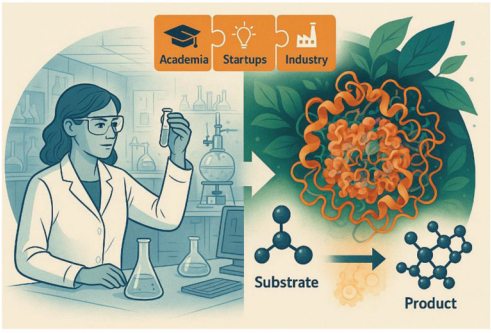
• Pour en savoir plus : www.eca.europa.eu/fr/publications/SR-2026-24

ACADÉMIE DES SCIENCES
INSTITUT DE FRANCE

Comptes Rendus Chimie

Rédacteur en chef : Pierre Braunstein, Strasbourg
Rédacteurs associés : Janine Cossy, Paris
Azzedine Bousseksou, Toulouse
https://comptes-rendus.academie-sciences.fr/chimie

LA BIOCATALYSE EN SYNTHÈSE



Une étape marquante pour les *Comptes Rendus* de l'Académie des sciences fut l'accord de co-publication avec le CNRS signé le 3 décembre 2025. Pour prolonger l'initiative prise l'an dernier par les *Comptes Rendus Chimie* visant à renforcer nos liens avec la Société Chimique de France (SCF) et accroître la visibilité des résultats des recherches publiés dans cette revue, nous vous proposons aujourd'hui les synopsis d'articles publiés dans le numéro thématique **« La biocatalyse en synthèse »** qui fut coordonné par Juliette Martin (Proteus-Seqens).

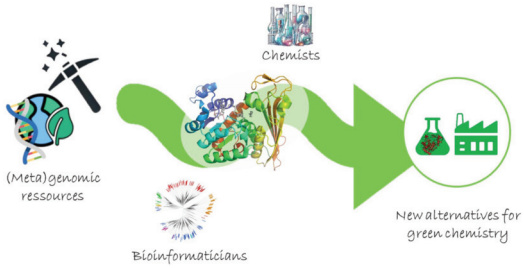
Nous remercions la SCF d'accueillir ces synopsis dans sa revue *L'Actualité Chimique* et, comme toujours, n'hésitez pas à nous faire part de vos avis et suggestions !

Pierre Braunstein

HARNESSING NATIVE ENZYME DIVERSITY FOR BIOCATALYSIS

Célestin Gamonet, Anne Zaparucha, Carine Vergne-Vaxelaire
DOI : 10.5802/crchim.409

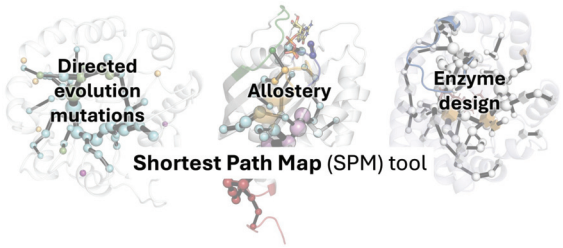
Keywords: Sequence-driven enzyme discovery, Biodiversity, Biocatalysts, Nitrilase, Dioxygenase, CoA ligases, Amine dehydrogenase



SHORTEST PATH MAP CORRELATION-BASED TOOL FOR CAPTURING FUNCTIONALLY RELEVANT ALLOSTERIC NETWORKS AND ITS APPLICATION IN ENZYME DESIGN

Esther Pruna Cortada, Sílvia Osuna
DOI: 10.5802/crchim.389

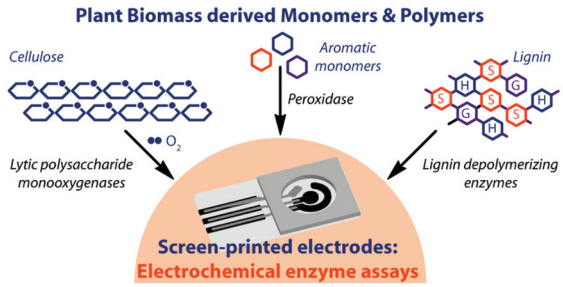
Keywords: Molecular dynamics simulations, Correlation-based tools, Enzyme design, Shortest Path Map, Allostery



SCREEN-PRINTED CARBON ELECTRODES AS A TOOL FOR THE DISCOVERY AND THE CHARACTERIZATION OF NEW ENZYMES ACTIVE ON LIGNOCELLULOSIC BIOMASS

Marjorie Ochs, Bastien Doumèche
DOI: 10.5802/crchim.406

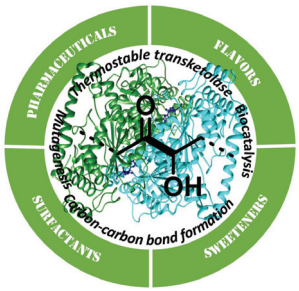
Keywords: Screen-printed carbon electrodes, Paper-based electrodes, Ligninase, Lytic polysaccharide monooxygenase, Oxidase, Detection of aromatic and hydroxycinnamic compounds



EXTENDING THE TOOLBOX FOR ENZYMATIC CARBOLIGATION: SYNTHESIS OF α-HYDROXYKETONES CATALYZED BY THERMOSTABLE TRANSKETOLASE FROM *GEOBACILLUS STEAROTHERMOPHILUS*

Franck Charmantray, Laurence Hecquet
DOI: 10.5802/crchim.376

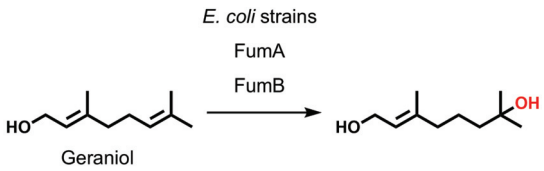
Keywords: Biocatalysis, Thiamine-dependent enzyme, C–C bond formation, Transketolase, Mutagenesis, α-hydroxyketones



REGIOSELECTIVE HYDRATION OF GERANIOL BY *ESCHERICHIA COLI* FUMARASES IN WHOLE-CELL BIOTRANSFORMATIONS

Natalie Härterich, Philip Horz, Yingtong Fan, Benjamin Aberle, Bernhard Hauer
DOI: 10.5802/crchim.407

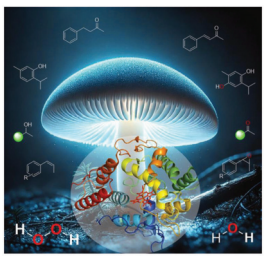
Keywords: Fumarase, Hydratase, Water addition, Geraniol, Terpenes, Alkenes



FROM CHARACTERIZATION TO BIOCATALYTIC APPLICATION OF TWO PEROXYGENASES FROM *COLLARIELLA VIRESCENS* AND *DALDINIA CALDARIORUM*

Angelique Pothuizen, Rosalie I. Wouters, Hugo Brasselet, Thomas Hilberath, Yinqi Wu, Frank Hollmann
DOI: 10.5802/crchim.375

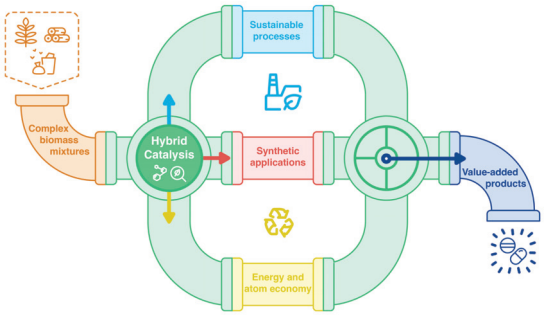
Keywords: Peroxygenase, Oxidation, Hydroxylation, Epoxidation, Sulfoxidation, *Collariella virescens*, *Daldinia caldariorum*



HYBRID CATALYSIS: AN EFFICIENT TOOL FOR BIOMASS VALORIZATION AND FOR THE PRODUCTION OF NEW BUILDING BLOCKS IN CHEMISTRY

Sara Arteche Echeverría, Rénato Froidevaux, Sarah Gaborieau, Anne Zaparucha, Egon Heuson
DOI : 10.5802/crchim.398

Keywords: Hybrid catalysis, Biomass, Platform molecules, Enzymes, Chemical catalysts, Green Chemistry



BIOCATALYSIS, A GREAT TOOLBOX FOR THE UPGRADING OF BIOMASS

Louis Michel Marie Mouterde, Florent Allais
DOI: 10.5802/crchim.405

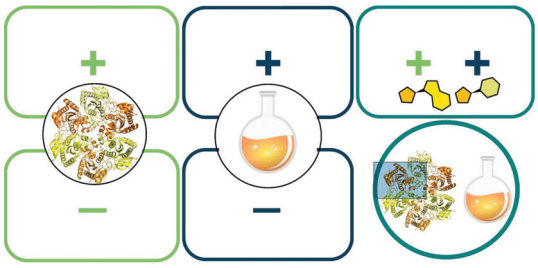
Keywords: Green chemistry, Biocatalysis, Molecular biology, Enzymes, Biomass, Bio-based molecules



NUCLEOSIDE CHEMISTRY: A CHALLENGE BEST TACKLED TOGETHER

Sarah Westarp, Peter Neubauer, Anke Kurreck
DOI: 10.5802/crchim.388

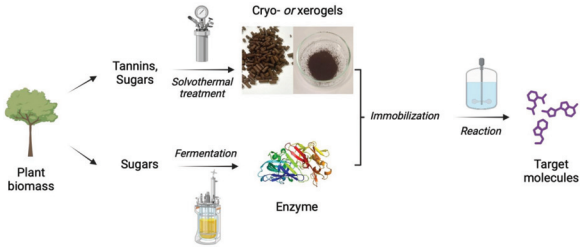
Keywords: Nucleoside synthesis, Biocatalysis, Chemoenzymatic synthesis, *N*-glycosylation, Nucleoside analogue



INNOVATIVE CARRIER MATERIALS FOR ADVANCING ENZYME IMMOBILIZATION IN INDUSTRIAL BIOCATALYSIS

Quentin Hanniet, Coline Mateos, Ludivine Onillon, Awilda Maccow, Thierry Gefflaut, Mélanie Hall, Tamara Reiter, Mélanie Bordeaux, Nicolas Brun, Jullien Drone
DOI: 10.5802/crchim.397

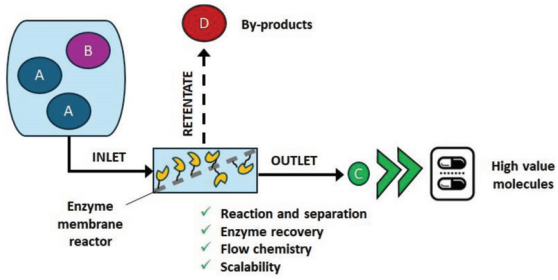
Keywords: Enzyme immobilization, Lipase, Transaminase, Old yellow enzyme, Hydrothermal carbonization, Biobased carrier, Industrial biocatalysis



ENZYME-MEMBRANE REACTORS: RECENT TRENDS AND APPLICATIONS FOR THE PRODUCTION OF FINE CHEMICALS AND PHARMACEUTICAL BUILDING BLOCKS

Hippolyte Meersseman Arango, Patricia Luis, Tom Leyssens, Damien P. Debecker
DOI: 10.5802/crchim.378

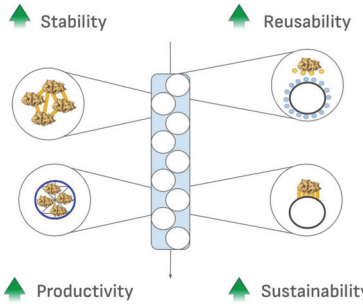
Keywords: Biocatalysis, Membranes, Membrane processes, Intensification, Enzyme immobilization, Pharmaceutical industry



BIOCATALYSIS IN PACKED-BED REACTORS: IMMOBILIZATION AS AN ENABLING TECHNOLOGY

Cristina Lía Fernández Regueiro, David Roura Padrosa, Francesca Paradisi
DOI: 10.5802/crchim.386

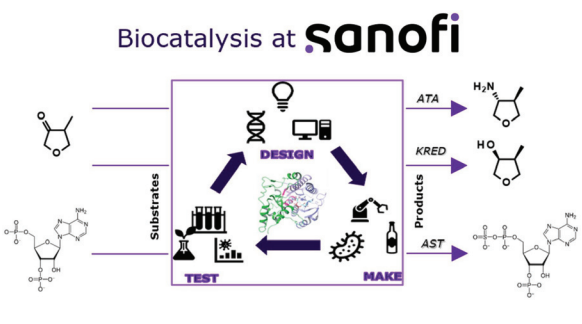
Keywords: Biocatalysis, Enzyme immobilization, Flow biocatalysis, Packed-bed reactors



ACCELERATING THE IMPLEMENTATION OF BIOCATALYSIS IN PHARMACEUTICAL RESEARCH AND DEVELOPMENT PORTFOLIO

Alain Rabion, Davide Panigada, Sebastien Roy, Antony Bigot, Jason S. Tedrow
DOI: 10.5802/crchim.395

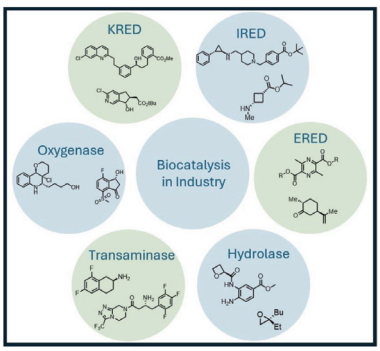
Keywords: Biocatalysis, Transaminase, Ketoreductase, Tetrahydrofuran derivative, Chirality, Green chemistry, Enzyme evolution



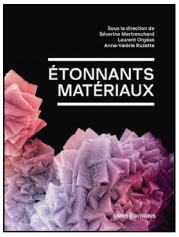
PRACTICAL EXAMPLES OF BIOCATALYSIS IN INDUSTRY

Amelia K. Gilio, Miguel A. Abdo, Carlos A. Martinez, Andrew T. Palaia, Jovan Livada
DOI: 10.5802/crchim.408

Keywords: Enzyme, Biocatalysis, Hydrolase, Ketoreductase, Imine-reductase, Ene-reductase, Transaminase



Avis de lecteurs



Étonnants matériaux
S. Martrenchard, L. Orgéas, A.-V. Ruzette (dir.)
26 €, ebook : 18,99 €, 448 p.
CNRS Éditions, 2026

Cet ouvrage collectif, consacré à tous les domaines de la science des matériaux, est constitué de 60 articles indépendants rédigés par 150 chercheurs et chercheuses français. L'accent est mis sur des matériaux innovants, dans une attention portée à leur capacité à répondre aux enjeux de notre époque, notamment climatiques. Écrit avec beaucoup de pédagogie, illustré d'images et de figures très claires, il est accessible à un large public avec une culture scientifique de niveau lycée-premières années de licence.

L'ouvrage s'ouvre sur une table des matières thématique en 13 chapitres, chacun composé d'articles de 4-5 pages constituant une mise au point sur le sujet traité. Après une introduction simple et historique qui pose bien le problème, le lecteur est invité progressivement au cœur de l'actualité de la recherche.

Quelles évolutions la science des matériaux connaît-elle aujourd'hui ? Devant l'impossibilité d'aborder tous les thèmes présents dans l'ouvrage, je me limiterai à quelques exemples qui ont attiré mon attention au cours de la lecture.

J'ai noté la définition claire et simple d'un matériau composite, qui est un assemblage de matériaux dont l'association lui donne des propriétés que les composants pris séparément ne possèdent pas. Ils peuvent participer au développement de technologies de défense avancées. Leur légèreté permet déjà de réduire la production de CO_2. Chaque année, 1,9 milliard de tonnes d'acier sont dédiées à la construction et à l'industrie automobile, quand 69 milliards de tonnes d'aluminium sont destinées à l'aéronautique et aux emballages. 25 millions de tonnes de cuivre sont utilisées pour fabriquer des câbles électriques, 3 millions de tonnes de nickel équipent les turbines aéronautiques et 1 million de tonnes de magnésium se trouvent dans la fabrication des smartphones[(1)]. Or, les « alliages à haute entropie », devenant particulièrement résistants et peu denses, représentent une utilité particulière en aéronautique, tout en promettant un allègement encore accru de la production de CO_2. Dans le domaine de l'électronique, les « isolants de Mott » pourraient réduire d'un facteur 1000 la consommation électrique demandée par l'intelligence artificielle. Autres matériaux prometteurs, les métamatériaux optiques permettent entre autres de forcer la lumière à contourner un objet à cacher – à l'image, comme le signale l'auteur, de la fameuse cape d'invisibilité d'Harry Potter ! La microscopie électronique à très haute résolution permet pour sa part la mise en évidence des microstructures expliquant les propriétés exceptionnelles de l'acier de Damas connu depuis l'Antiquité. En ce qui concerne la transformation et la fabrication de la matière, l'impression 4D promet de réaliser des objets non plus définitifs mais évolutifs sous l'action de l'humidité, de la pression, de la température, d'un champ électrique, d'un champ magnétique. La technique de la microfluidique permet quant à elle des mélanges en des temps de l'ordre de la milliseconde, ce qui est très utile pour des réactions sensibles. Cette maîtrise des flux et des temps de réaction a permis entre autres la production des vaccins à ARN messager contre le COVID 19. Concernant les matériaux pour la médecine ou la biomimétique, des implants hybrides en céramique poreuse et hydrogels chargés de cellules souches permettent d'envisager une reconstruction osseuse toujours plus performante, tandis que les hydrogels injectables permettraient de mieux réparer nos genoux.

On peut aussi observer et révéler l'invisible, par exemple suivre une catalyse hétérogène par microscopie électronique en transmission d'un mélange réactionnel gazeux sur une nanoparticule d'oxyde de cérium.

En conclusion, le CNRS a eu l'excellente idée de rassembler dans un seul livre les interventions de celles et ceux qui ont permis de mettre à notre disposition les progrès de la science des matériaux. Je suis sûr que cet ouvrage trouvera une place de choix dans les bibliothèques de chacune et chacun d'entre nous !

Jean-Pierre Foulon

(1) Cité dans S. Gorsse, C. Varvenne, « Alliages à haute entropie, À la conquête d'un continent métallique inexploré », p. 30.



La foisonnante histoire du nom des molécules
P. Avenas, S. Bléneau-Serdel
22 €, ebook : 14,99 €, 250 p.
EDP Sciences, 2026

La suite de *La prodigieuse histoire du nom des éléments* est enfin disponible et c'est un vrai bonheur !

Si les éléments chimiques de notre univers sont limités, les molécules, elles, ne pouvaient être que foisonnantes et cela ouvre le champ à d'autres livres.

Je me régale à lire les « Clins d'œil étymologiques » à chaque numéro de *L'Actualité Chimique*, mais cette compilation dans un livre est un merveilleux voyage dans le monde des molécules proposé à un plus large public. L'aide chimique présentée est intéressante pour ceux qui voudraient se rappeler leurs souvenirs scolaires !

Regroupées par thèmes, les molécules sont mises en valeur depuis leur découverte, leur histoire avec l'origine de leurs noms. En tant que chimiste, j'ai appris beaucoup de choses dans des domaines que je connaissais peu ou pas, mais j'ai eu aussi beaucoup de plaisir à lire des aventures auxquelles j'ai participé dans le domaine pharmaceutique.

L'apport de l'étymologie du nom de ces molécules et de leur histoire rend la

lecture plaisante et d'un aspect moins abscons que leurs formules chimiques. Les illustrations sont bien choisies et rendent l'ouvrage agréable à lire et à mémoriser lorsqu'il s'agit de molécules simples et connues.
C'est un livre qui peut facilement être lu par chapitre et pas forcément dans l'ordre mais par centre d'intérêt du lecteur. J'ai hâte de lire une suite à ce recueil qui ne manquera pas de venir…
Merci pour ce joli travail de vulgarisation positive de notre science au travers de cet ouvrage.

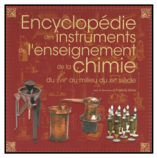
Philippe Mackiewicz

À signaler



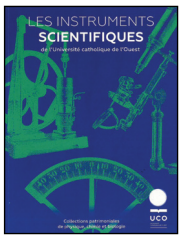
Chimie et habitat
D. Olivier, P. Rigny (coord.)
25 €, ebook : 16,99 €, 204 p.
EDP Sciences, 2026

L'habitat est au cœur des enjeux contemporains : transition écologique, crise énergétique, évolution des modes de vie et besoins sociétaux. Face à ces défis majeurs, la chimie joue un rôle clé en proposant des solutions innovantes pour construire, rénover et habiter autrement.
De la conception des matériaux durables à la décarbonation des processus de construction, en passant par l'optimisation énergétique et l'intégration des nouvelles technologies, cet ouvrage offre une vision complète des contributions de la chimie à l'habitat du futur. Il explique par exemple comment l'on pourrait s'inspirer des savoir-faire du passé – maisons en terre, en bois – pour adapter les constructions aux nouvelles contraintes environnementales. Il aborde des thèmes aussi variés que les matériaux intelligents (vitrages, adhésifs, béton recyclé, bois de construction), les procédés de construction innovants (impression 3D, terre crue, isolation performante), les défis environnementaux (recyclage, économie circulaire, réduction de l'empreinte carbone) ou les enjeux sociétaux (accessibilité, bien-être, urbanisme inclusif).
À travers des exemples concrets et des retours d'expérience, les auteurs montrent comment la chimie permet de concilier performance, durabilité et qualité de vie.



Encyclopédie des instruments de l'enseignement de la chimie du XVIIIe siècle au milieu du XXe siècle
F. Gires (dir.)
40 €, 444 p.
ASEISTE* – Niort, 2026

Après l'*Encyclopédie des instruments de l'enseignement de la physique du XVIIIe au milieu du XXe siècle*, parue en trois volumes en 2016 (1348 p.), cette nouvelle encyclopédie éditée par l'Association pour la Sauvegarde et l'Étude des Instruments Scientifiques de l'Enseignement (ASEISTE) présente les fiches typologiques de 360 instruments – avec de nombreuses illustrations – ayant servi à enseigner la chimie durant cette période, à partir des collections de la soixantaine d'établissements (collèges, lycées, universités, École polytechnique, musées, deux établissements espagnols) présents sur le site de l'ASEISTE. L'Encyclopédie comprend également deux contributions sur l'histoire de l'enseignement de la chimie du XVIIIe à 1902 par Danielle Fauque et de 1902 à nos jours par Marie-Blanche Mauhourat.
*Édition limitée à 500 exemplaires, modalités d'achat : www.aseiste.org



Les instruments scientifiques de l'Université catholique de l'Ouest
G. Le Guillanton (dir.)
35 €, 414 p.
UCO, 2026
Coll. patrimoniales de physique, chimie et biologie

Cet ouvrage richement illustré présente environ 570 appareils de physique, chimie et biologie appartenant à la très riche collection d'instruments scientifiques de l'Université catholique d'Angers, constituée à partir des premiers appareils achetés en 1877 lors de l'ouverture de la faculté des sciences.



Bleu
Quand la nature invente l'exception
B. Valeur
25 €, ebook : 16,99 €, 136 p.
Éditions Quæ, 2026

L'omniprésence du bleu dans le ciel et les océans contraste avec sa déficience dans le monde vivant où les pigments bleus se font rares. Pourquoi une telle parcimonie ? Ce livre part à la quête de bleu, surabondant ou rare, commun ou insolite, pigmentaire ou structurel… une fascinante couleur d'exception.



Le saviez-vous ?
Alimentation, santé, cosmétiques, vie pratique. 150 réponses à nos questions du quotidien
X. Fernandez, illust. : C. Dubois
17,90 €, ebook : 12,99 €, 160 p.
De Boeck Supérieur, 2026

Pourquoi le poivre fait-il éternuer ? Pourquoi sommes-nous accros au sucre ? Les probiotiques sont-ils bons pour la santé ? Et les tatouages, sont-ils dangereux ? Pourquoi avons-nous le nez qui coule en hiver ?… 150 questions autour de quatre grands thèmes (alimentation, santé, cosmétiques et vie pratique) pour explorer la chimie qui se cache derrière les objets, les aliments et les phénomènes qui nous entourent, avec une approche à la fois accessible, rigoureuse et résolument ludique.



Peut-on créer la vie en laboratoire ?
C. Jeancolas
16 €, ebook : 10,99 €, 192 p.
EDP Sciences, 2026

L'auteur retranscrit à la manière d'une enquête, les activités d'un laboratoire de recherche français travaillant sur

l'origine de la vie. Il dissèque en détail les gestes des chercheurs lors des expériences et leurs discussions, pour établir exactement ce qu'il se fait et ce qu'il se dit. Les observations révèlent ainsi la fabrication d'étranges « protovies » : prototypes d'êtres vivants situés entre l'inerte et la vie.

Ce livre composite est l'aboutissement d'un travail collectif profondément interdisciplinaire, mêlant biochimie, anthropologie sociale et philosophie des sciences. Les détails de mécanismes biomoléculaires côtoient ainsi des descriptions de pratiques humaines et des élaborations conceptuelles, pour comprendre ce qu'une seule discipline ne pourrait saisir : peut-on créer la vie ?

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

La Rédaction de *L'Actualité Chimique* a sélectionné pour vous les articles suivants :



N° 1087 (Octobre 2026)

- L'osmose : dilution entropique, par F. Cohen Tenoudji et F. Segretain

Le transport sélectif de particules à travers une membrane séparant deux solutions de concentrations différentes en solutés est appelé osmose. Le phénomène osmotique se rencontre dans de nombreuses situations, en biologie, en chimie ainsi que dans d'autres domaines. Elle joue un rôle fondamental en biologie où elle détermine les équilibres des systèmes biologiques, animaux ou végétaux. On peut la décrire comme le déplacement d'un système vers son équilibre thermodynamique. Il est essentiel pour ceux qui travaillent dans ces domaines, ainsi que pour les enseignants qui les forment, d'avoir une compréhension intuitive et simple de ces phénomènes. Bien que l'osmose soit parfaitement expliquée dans les manuels de thermodynamique, les étudiants restent souvent insatisfaits, avec l'impression de ne pas avoir tout à fait bien intégré le phénomène qualifié généralement sous le nom de pression osmotique. Cet article soutient que la notion même de « pression osmotique » est problématique et que cette terminologie devrait être reconsidérée. Il propose de la remplacer par la qualification de « contrainte entropique », l'osmose étant reconnue comme une dilution entropique. Pour faciliter la compréhension, les auteurs utilisent l'approche statistique de la thermodynamique. Dans cette approche, l'osmose apparaît naturellement comme une conséquence du deuxième principe de la thermodynamique qui régit l'évolution temporelle irréversible des systèmes physiques isolés.

- Incertitudes, à quoi s'attendre en TP ?: balances et pesées, par M. Melzani

Cet article s'intéresse aux pesées avec une balance de laboratoire, comme celles utilisées en travaux pratiques. Il explique comment estimer l'incertitude de mesure à partir des informations de la notice (linéarité et reproductibilité), et discute de l'incertitude en sensibilité. Dans un second temps, l'étude expérimentale du parc de balances d'un lycée permet de souligner l'importance d'un étalonnage régulier des balances. L'auteur présente les classes de masses d'étalonnage et explique le principe d'un étalonnage. D'autres facteurs qui influencent la pesée sont discutés (poussée d'Archimède et masse conventionnelle, pesanteur, inclinaison du plateau…), et le fonctionnement d'une balance est sommairement présenté.

- La 42^{e} édition des Olympiades nationales de la chimie : compte rendu de la cérémonie et des épreuves, par J. Calafell, C. Ageorges, P. Agulhon et E. Jullien-Macchi

Lors de la dernière édition, les épreuves se sont déroulées à l'Université Sorbonne Paris Nord (à Bobigny) : 52 élèves sélectionnés parmi plus de 3600 candidats provenant de toute la France et de lycées français à l'étranger ont participé aux épreuves finales du concours national qui se sont tenues à Paris les 5 et 6 mai 2026, sur le thème « Chimie verte ».

• Sommaire complet, résumés des articles et modalités d'achat sur www.udppc.asso.fr

Reflets de la physique



N° 85 (Juillet 2026)

- La longue saga des effets quantiques dimensionnels dans les matériaux. Le prix Nobel de chimie 2023 pour les boites quantiques, atomes artificiels, par C. Weisbuch

https://doi.org/10.1051/refdp/202685014

Le prix Nobel de chimie 2023 a été décerné aux découvreurs des boites quantiques (BQ), objets dont les dimensions sont de l'ordre de la longueur d'onde de de Broglie, nanométriques. Comme c'est assez souvent le cas, ces objets quantiques ont eu des précurseurs qui n'ont pas été identifiés comme tels : ils ne pouvaient être perçus comme « quantiques » avant l'arrivée de la théorie éponyme en 1925-1927. Ensuite, les réalisations sont à base de semi-conducteurs dont l'identification comme isolants de faible bande interdite est venue encore plus tard, avec la théorie de bandes dans les solides, en 1932-1933. La mesure des tailles des boites quantiques n'a pu être effectuée que lorsque des techniques de mesure très submicroniques sont apparues. Enfin, les boites quantiques semi-conductrices ont été « découvertes » quand on a prêté attention à leurs propriétés optiques, reliant leur spectroscopie à leur taille.

- Synchrotrons : la révolution de l'extrêmement brillant, par J. Daillant, G. Martínez-Criado et M. Krisch

https://doi.org/10.1051/refdp/202685027

Cinq ans après la mise en service de l'*Extremely Brilliant Source* (EBS) de l'ESRF (*European Synchrotron Radiation Facility*) à Grenoble, un premier bilan de l'apport de cette nouvelle source de rayonnement synchrotron peut être dressé. Celle-ci marque un changement de paradigme, tant sur le plan technologique que dans la manière d'utiliser les synchrotrons.

- Voir à l'intérieur des batteries grâce au synchrotron, par S. Lyonnard

https://doi.org/10.1051/refdp/202685031

Les techniques synchrotron sont puissantes pour regarder à l'intérieur des batteries pendant qu'elles fonctionnent, grâce à la capacité des rayons X de haute énergie à pénétrer les objets massifs. Cela rend possible la caractérisation de systèmes réels ou modèles en temps réel, par exemple en mode operando (c'est-à-dire en cours de fonctionnement). Grâce à la brillance et à la cohérence des faisceaux générés sur l'*Extremely Brilliant Source* (EBS) à l'ESRF (*European Synchrotron Research Facility*), il est possible d'atteindre des échelles spatiotemporelles inégalées. On peut désormais cartographier les propriétés dynamiques des matériaux avec une sensibilité ou une résolution extrême. Pour le cas des batteries présenté ici, on montre qu'il est possible d'accéder à une compréhension plus fine et plus holistique de leurs mécanismes de réaction et de dégradation.



N° 86 (Octobre 2026)

- Les alliages à haute entropie : une nouvelle manière de penser les alliages, par S. Gorsse et D. B. Miracle

https://doi.org/10.1051/refdp/202686024

Les alliages à haute entropie sont des alliages constitués de plusieurs éléments principaux présents en proportions comparables, contrairement aux alliages conventionnels fondés sur un élément majoritaire. Apparue au début des années 2000, cette approche a profondément renouvelé la métallurgie en ouvrant l'exploration des régions centrales des diagrammes multicomposants et en révélant la possibilité de former des solutions solides simples malgré une forte complexité chimique. Après avoir rappelé les principes qui fondent la notion de « haute entropie », cet article revient sur les concepts clés associés à ces alliages – notamment les caractéristiques connues sous le nom d'« effets de cœur » – avant de montrer comment ces alliages sont devenus un vaste champ d'exploration pour la conception de nouveaux matériaux structuraux et fonctionnels.

- Les alliages à haute entropie : 200 ans d'histoire, 20 ans d'effervescence, par S. Gorsse et D. B. Miracle

https://doi.org/10.1051/refdp/202686024

Le concept d'alliage à haute entropie, popularisé au début des années 2000 par les travaux de Brian Cantor et Jien-Wei Yeh, s'inscrit en réalité dans une histoire beaucoup plus ancienne, remontant jusqu'aux travaux visionnaires de Franz Karl Achard au XVIII^{e} siècle. Cet article retrace l'émergence et l'essor des alliages à haute entropie, depuis leurs origines historiques jusqu'à l'explosion récente des recherches, et discute leurs propriétés remarquables, leurs perspectives d'applications et les limites qui freinent encore leur diffusion industrielle.

• Numéros complets en accès libre sur www.refletsdelaphysique.fr

Agenda

24-26 novembre 2026
Colloque « Climat et Impacts »
Gif-sur-Yvette
https://premc.org/climat-impacts-2026

25 novembre 2026
Nourrir la planète en 2050… vu par un chimiste
Paris
Conférence grand public d'Hervé This, gratuit sur inscription.
https://framaforms.org/inscription-a-la-conference-sur-la-gastronomie-moleculaire-et-physique-du-25-novembre-2026

2-4 décembre 2026
Journées Formulation 2026
Formulation et alimentation durables
Villeneuve d'Ascq
Voir *L'Act. Chim.* 519, p. 61.
https://jf2026.sciencesconf.org

3 décembre 2026
6e Rencontres académie-industrie du CNC
La chimie intégrative, du concept aux procédés pour les matériaux
Paris
www.cncchimie.org/rencontres-cnc-6

3-4 décembre 2026
2e Journées des sections régionales Auvergne et Centre-Ouest
Chimie, énergie et santé
Limoges
Voir p. 61.
www.unilim.fr/scfcoa2

4 décembre 2026
12e Journée Nobel de Nice
Nice
Voir p. 61.
https://inphyni.univ-cotedazur.fr/sites/journee-nobel

4 décembre 2026
Matinée d'hommage à Andrée Marquet
Paris
Voir p. 50.
https://fondation.maisondelachimie.com/evenement/mmatinee-dhommage-a-andree-marquet

9 décembre 2026
Future of BioLignin 2026
Industrial Lignin Valorization for Market-Ready Materials and Chemicals
Online
www.b2match.com/e/future-of-biolignin

10 décembre 2026
Journée d'Automne de la division Chimie organique
Paris
Voir p. 62.
https://dco-automne2023.sciencesconf.org

10-13 décembre 2026
Village de la Chimie AURA
Stand dans le cadre du Mondial des Métiers
Lyon
www.mondial-metiers.com

14-15 décembre 2026
Workshop « Recent advances in chemistry and IA »
Paris
www.chimieparistech.psl.eu/evenement-agenda/workshop-psl-ia-chimie

28-29 janvier 2027
JCC 2027
Journées de la Chimie de Coordination
Rennes
Voir *L'Act. Chim.* 519, p. 62.
https://jcc2027.sciencesconf.org

1-2 février 2027
Rhéologie & Polymères : Transformer les défis académiques en succès industriels
Aulnay-sous-Bois
www.gfp.legfr.fr

15-18 mars 2027
Congrès International de Métrologie CIM 2027
Lyon
www.cim-metrology.org

16-18 mars 2027
Beyond Waste 2027
Recycling of materials from atoms to systems
Lille
https://beyondwaste2027.sciencesconf.org

5-7 avril 2027
Journées scientifiques SCF-Bretagne-Pays de Loire
Le Croisic
https://scf-bpl2026.sciencesconf.org

9-14 mai 2027
EPF School 2027
Recycling and recyclability of polymers: from fundamentals to holistic approaches
Bertinoro (Italie)
www.epfwebsite.org

10-11 mai 2027
16th International Workshop on Molecular and Physical Gastronomy
Measurements: foundations, tools, scales and open questions
Colmar
https://icmpg.hub.inrae.fr/international-activities-of-the-international-centre-of-molecular-gastronomy/conferences-lectures-workshops/iwmpg/16-iwmpg

23-27 mai 2027
EPF EUPOC 2027 Conference
Polymers at phase boundaries: from fundamentals to applications
Bertinoro (Italie)
www.epfwebsite.org

25-28 mai 2027
Supra@Angers 2027
Advances in supramolecular chemistry
Angers
Voir p. 62.
https://supra-angers-2027.cnrs.fr

30 mai-4 juin 2027
SECO64
Semaine d'Etudes en Chimie Organique
Ile d'Oléron
https://congres-seco.com

31 mai-4 juin 2027
GECat 2027
Autrans
Voir *L'Act. Chim.* 519, p. 62.
https://gecat2027.sciencesconf.org

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

En direct de EuChemS

EuChemS Industry Innovation Award

Vous connaissez un chercheur/une chercheuse ou une équipe de chercheurs qui apporte une contribution remarquable à l'innovation dans l'industrie chimique ? Le Prix « Industry Innovation » remis par EuChemS chaque année depuis 2024 célèbre des réalisations remarquables et des contributions à l'innovation dans les sciences chimiques pour l'industrie. Les nominations sont ouvertes. Nous vous encourageons à proposer des candidat.es méritant.es et à faire passer le message au sein de vos réseaux. Aidez-nous à reconnaître les innovateurs.trices qui façonnent l'avenir de la chimie en Europe ! Retrouvez les **autres appels à prix ouverts par EuChemS** sur le site : EuChemS Gold Medal, EuChemS Historical Landmarks Award, EuChemS Young Chemists' Award, EuChemS Lecture Award, EuChemS Award for Service.

• Date limite d'envoi du dossier de nomination : **18 décembre 2026**.

www.euchems.eu/awards/euchems-industry-innovation-award

Prix des entités

Division Chimie Industrielle

Prix de thèse DCI 2026 : appel à candidatures

La division Chimie Industrielle (DCI) de la SCF lance un appel à candidatures pour son Prix de thèse, destiné à récompenser une thèse de doctorat particulièrement remarquable portant sur des travaux à vocation industrielle en chimie.

Ce prix doté de 1000 €, d'une adhésion d'un an à la SCF, ainsi que d'une inscription au prochain congrès de la DCI (« French Industrial Chemistry Symposium »), s'adresse à toute personne ayant soutenu sa thèse après le 1er janvier 2024.

La thèse devra porter sur un sujet à vocation industrielle ou aborder des problématiques clairement liées à la chimie industrielle : procédés, catalyse, formulation, procédés continus, ingénierie chimique appliquée, écoconception, valorisation de flux, sécurité industrielle… Elle peut être issue d'un laboratoire académique seul ou d'une collaboration académie-industrie (y compris dans le cadre de projets subventionnés ANR, ADEME, CIFRE, Europe…). La réalisation en partenariat avec une entreprise, un dépôt de brevet, la création d'une start-up, ou toute action de valorisation industrielle seront des plus appréciés, sans toutefois constituer une condition d'éligibilité.

Dossier de candidature (dossier unique format pdf) : CV (1 page max.), résumé des travaux réalisés (2 pages max.), liste des contributions scientifiques (publications, brevets, conférences…), attestation de soutenance, lettre de recommandation du directeur de thèse.

• Candidature à adresser **avant le 7 décembre 2026** au président de la DCI : dci-bureau@societechimiquedefrance.fr

Section régionale PACA

Prix de thèse SCF Sud-PACA 2027

Ce prix, d'un montant de 500 €, est financé par la section régionale PACA et sera remis lors de la Journée de la Chimie SCF Sud-PACA le 16 avril 2027, où la lauréate ou le lauréat présentera ses travaux sous forme d'une communication orale. Il distingue des doctorant.es ayant mené leurs travaux en Sud-PACA et ayant contribué à des avancées majeures dans leur domaine.

• Date limite de dépôt des dossiers : **31 janvier 2027**.

Manifestations

3-4 décembre 2026

2èmes Journées des sections régionales Auvergne et Centre-Ouest

Limoges



Gare de Limoges, © Michael Reix.

Les sections Centre-Ouest et Auvergne de la SCF s'associent autour d'un colloque commun qui aura lieu début décembre sur le site de l'IrCer à Limoges.

Au programme : des conférences plénières sur les thèmes Chimie-Énergie et Chimie-Santé – « Fluorescent probes for bacterial studies and imaging of bacterial infections » par Julie Karpenko (Faculté de Pharmacie, Univ. Strasbourg), « Carbures et nitrures : des catalyseurs hétérogènes prometteurs » par Franck Tessier (Institut de Chimie de Rennes), « Le graphite, sa vie, son œuvre (en batterie !), son recyclage » par Laure Monconduit (Pôle Chimie Balard Recherche, Institut Charles Gerhardt de Montpellier) – ; des conférences invitées (sections régionales Centre-Ouest et Auvergne) ; des communications orales d'étudiants, doctorants et postdoctorants ; deux tables rondes sur les thèmes « Pédagogie et IA » et « IA et la recherche en sciences chimiques ».

• Date limite de soumission des résumés : **20 novembre 2026**.

Programme, soumission des résumés et inscriptions : www.unilim.fr/scfcoa2

4 décembre 2026

Journée Nobel 2026

Nice



La Journée Nobel de Nice a pour objectif de décrypter l'excellence scientifique mondiale. Elle permet d'informer, grâce à des présentations courtes, sur les raisons qui ont conduit les lauréats 2026 à recevoir les prestigieux prix Nobel en médecine, physique, chimie et littérature. Cet événement est organisé par l'Ambassade de Suède en France, en partenariat avec l'Université Côte d'Azur, le Consulat de Suède à Nice, le CNRS, la Société Française de Physique et la Société Chimique de France.

Après le succès des précédentes éditions, la 12e édition de cette Journée Nobel accueillera notamment **Anne L'Huillier, prix Nobel de physique 2023**, qui donnera une conférence d'honneur, et Emmanuelle Schulz (Institut de Chimie Moléculaire et des Matériaux d'Orsay, Univ. Paris-Saclay/CNRS), qui présentera les prix Nobel de chimie 2026 Henri Kagan et Kenso Soai.

• Programme complet et inscriptions : https://inphyni.univ-cotedazur.fr/sites/journee-nobel

10 décembre
Journée d'Automne 2026 de la division Chimie Organique
Paris

Organisée chaque année par la division Chimie Organique (DCO) de la SCF, la Journée d'Automne réunit chercheur.ses, enseignant.es-chercheur.ses, doctorant.es et industriel.les autour des avancées récentes de la discipline. Devenue un temps fort de la vie de la communauté, elle offre l'occasion de découvrir des travaux scientifiques de premier plan, de distinguer les lauréat.es des prix de la division et de valoriser les jeunes talents, tout en encourageant les échanges entre les participants.

L'édition 2026 se tiendra le jeudi 10 décembre sur le site Odéon de l'Université Paris Cité, avec le soutien de l'UFR des Sciences Fondamentales et Biomédicales et du Laboratoire de Chimie et Biochimie Pharmacologiques et Toxicologiques (LCBPT, UMR 8601 CNRS).

Conférences plénières



Maria DUCA,
Université Côte d'Azur



Peter SCHREINER,
Justus Liebig Universität Giessen (All.)

Conférences invitées



Zacharias AMARA
CNAM, Paris



Olivier CHARRON
ESPCI Paris-PSL



Abdul-Halim OBEID
Université Paris-Saclay



Eugénie ROMERO-LABOUREUR
CEA Saclay



Sébastien ULRICH
IBMM, Montpellier

Le programme comprendra deux conférences plénières par des collègues de renommée internationale : Maria Duca (Université Côte d'Azur), qui présentera ses travaux sur la reconnaissance et la modulation des ARN non codants par des petites molécules de synthèse [1], et Peter Schreiner (Université Justus Liebig de Giessen, Allemagne), spécialiste de chimie organique physique, qui présentera une conférence intitulée : « London dispersion in molecular chemistry ».

La manifestation mettra également à l'honneur les lauréat.es 2026 des prix de la DCO : Olivier Charron (ESPCI Paris-PSL), prix de thèse Dina Surdin ; Abdul-Halim Obeid (Université Paris-Saclay), prix de thèse Henri Kagan ; Eugénie Romero-Laboureur (CEA Saclay), prix Émergence Marc Julia ; Sébastien Ulrich (IBMM, Montpellier), prix chercheur Jean-Marie Lehn, et Zacharias Amara (CNAM, Paris), prix EurJOC-SCF. Leurs conférences témoigneront de la vitalité et de la diversité de la recherche en chimie organique, de la catalyse asymétrique à la photochimie, en passant par la chimie organométallique, la chimie bioorganique et la chimie supramoléculaire.

Une place particulière sera par ailleurs réservée aux jeunes scientifiques, avec deux communications orales sélectionnées parmi les candidatures de chercheur.ses et d'enseignant.es-chercheur.ses membres de la SCF occupant un poste permanent depuis moins de dix ans. Cette initiative leur permettra de présenter leurs projets et de faire connaître leurs contributions à la discipline.

Au-delà des conférences, cette Journée d'Automne constituera un moment privilégié de rencontres et de discussions, dans un esprit de convivialité et de partage scientifique. Un rendez-vous scientifique à ne pas manquer !

• Informations et programme : https://dco-automne2026.sciencesconf.org

[1] Voir M. Duca, V. Michelet, Cibler un ARN oncogène par des petites molécules, *L'Act. Chim.*, **2025**, *505*, p. 17-20, https://doi.org/10.63133/scf.act-chim.2025.505.03

25-28 mai 2027
Supr@Angers 2027
Assembling molecules and people
Angers

Après Lyon en 2018, Strasbourg en 2021 et Paris en 2024, c'est à Angers que se réunira la communauté internationale de la chimie supramoléculaire lors de la prochaine édition des Supr@City. Sous la devise « Assembler les molécules et les personnes », le congrès mettra à l'honneur la diversité de la chimie supramoléculaire, et notamment la reconnaissance moléculaire, les processus d'auto-assemblage, les machines moléculaires, les matériaux fonctionnels et les applications à l'interface avec la biologie et les nanosciences.

Parmi les conférenciers invités, dont le prix Nobel de chimie 2016 Ben Feringa, les trois lauréats 2026 du groupe thématique Chimie Supramoléculaire de la SCF présenteront leurs travaux : Ivan Huc, lauréat du prix André Collet, Alexandre Martinez, lauréat du prix Henry Le Chatelier, et Matthieu Raynal, lauréat du prix Christiane Dietrich-Buchecker.

• Date limite de soumission des résumés : **1er mars 2027**.
https://supra-angers-2027.cnrs.fr

Une année passe vite…

Pensez à renouveler votre adhésion

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

Les cristaux dopés terres rares pour les technologies quantiques

Philippe GOLDNER, Diana SERRANO et Alexandre TALLAIRE

https://doi.org/10.63133/scf.act-chim.2026.520.01

Les technologies quantiques promettent de dépasser les limites des systèmes classiques actuels grâce aux propriétés uniques des systèmes quantiques, comme la possibilité d'obtenir des états de superposition ou intriqués. Ces derniers permettent, par exemple, d'établir de fortes corrélations entre des systèmes séparés par des grandes distances. Les technologies quantiques se développent à la fois dans des laboratoires académiques à travers le monde et dans des entreprises, depuis la start-up jusqu'à la multinationale. Ces technologies sont habituellement divisées en trois grandes catégories : les capteurs quantiques, qui sont par exemple capables de mesurer avec une très grande sensibilité et à une échelle atomique des champs magnétiques pour des applications dans la microélectronique ou la biologie ; les communications quantiques, qui peuvent assurer des communications dont la sécurité est garantie par les lois de la physique quantique ; le calcul ou la simulation quantique, pour lesquels il existe, dès aujourd'hui, des machines capables de dépasser les performances des plus puissants supercalculateurs classiques pour des tâches particulières.

À partir de ces dispositifs, dont certains sont disponibles commercialement, des efforts considérables doivent encore être menés pour augmenter leur performance, comme par exemple, la sensibilité, les distances de communication ou encore la puissance de calcul. Un défi particulièrement important est la création d'un réseau de communication quantique à l'échelle mondiale, équivalent à l'internet actuel [1]. Dans ce futur réseau, des ordinateurs, des capteurs et des liens de communication quantiques permettront de nouvelles applications comme le calcul quantique distribué ou des mesures augmentées par intrication.
Pour cela, des interfaces avec la lumière seront nécessaires. En effet, cette dernière est un excellent vecteur de l'information quantique et peut être transmise par des fibres optiques ou en espace libre par des liens satellitaires. De plus, des capacités de stockage et de traitement de l'information quantique sont également souhaitables. Une possibilité pour obtenir ces fonctionnalités est d'utiliser des matériaux optiquement actifs et d'exploiter leurs transitions optiques pour interagir avec la lumière et leurs transitions de spin pour les aspects de traitement et de stockage (*figure 1*).

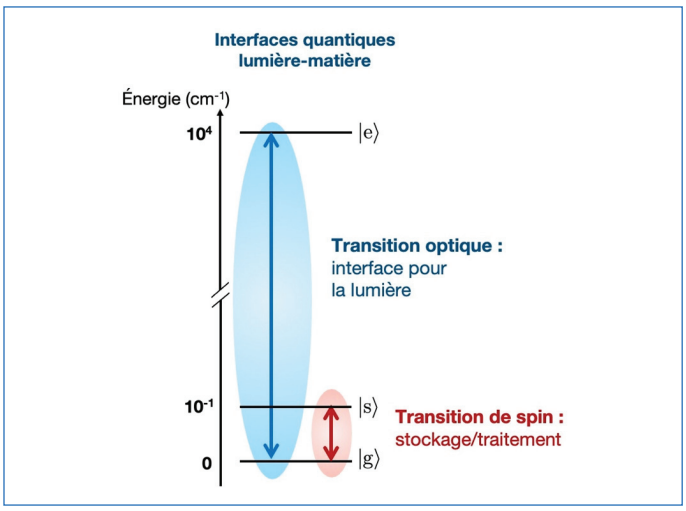


Figure 1 - Illustration de transitions optiques et de spin pour les interfaces quantiques avec la lumière. Les ellipses représentent des états de superposition quantique comme $(|g> + |e>)/\sqrt{2}$.

Différentes plateformes sont actuellement envisagées : boîtes quantiques semi-conductrices, centres colorés dans le diamant ou le silicium, ou encore cristaux dopés par des ions de terres rares (TR) [2]. L'intérêt pour ces derniers réside dans leur structure électronique particulière : les électrons 4f sont écrantés par des couches pleines $5s^2$ et $5p^6$, ce qui réduit considérablement l'influence de perturbations comme les phonons du cristal hôte sur les états quantiques optiques. Ceci est caractérisé par la durée de vie de ces états, notée T_2, qui peut atteindre des valeurs de l'ordre de la ms à basse température (< 3 K), les plus longues observées dans l'état solide à ce jour [3]. À noter que le temps T_2, qui représente la durée pendant laquelle un état de superposition entre les niveaux fondamentaux et excités reste bien défini, est différent du temps de vie du niveau excité, noté T_1, qui correspond à la relaxation du niveau excité vers le niveau fondamental, c'est-à-dire au retour vers l'équilibre thermodynamique.
Les terres rares possèdent de plus des spins électroniques et/ou des spins nucléaires, selon l'isotope considéré, pour lesquels de longs T_2 sont également observés. Les cristaux dopés TR sont ainsi capables de former des interfaces lumière-matière performantes au niveau quantique.
Les matrices envisagées sont multiples, comme le silicium, des silicates (Y_2SiO_5), des oxydes binaires (Y_2O_3, TiO_2), des tungstates ($CaWO_4$), des halogénures ($EuCl_3{:}6H_2O$) ou encore des cristaux moléculaires. Les TR les plus étudiées aujourd'hui, typiquement sous leur forme trivalente, sont le praséodyme (Pr^{3+}), l'europium (Eu^{3+}), l'ytterbium (Yb^{3+}) et l'erbium (Er^{3+}). Chaque combinaison matrice-TR présente des avantages particuliers, par exemple en termes de T_2 optique et de spin, de longueur d'onde et de force des transitions optiques, ou encore de concentration en dopants maximale. Le choix optimal est dicté par les expériences ou les applications envisagées, qui se trouvent principalement dans les domaines des communications quantiques (mémoires, sources de photons uniques intriqués avec des spins) et du calcul quantique (processeurs, transducteurs micro-onde/optique).
Les cristaux massifs sont à ce jour les matériaux qui présentent les meilleures propriétés grâce à la possibilité de les obtenir avec une grande qualité structurale et une haute pureté. De ce fait, les temps de cohérence optique et de spin sont typiquement limités par le bruit magnétique dû aux spins électroniques ou nucléaires présents dans la matrice. Ceux-ci doivent être réduits le plus possible tout en favorisant le dopage par les TR.

Un exemple de cristal très utilisé dans le domaine est l'orthosilicate d'yttrium, Y_2SiO_5 (*figure 2*). La présence de Y^{3+} permet un dopage par substitution isovalente pour les TR mentionnées plus haut, avec de plus des rayons ioniques voisins. Cette matrice ne comprend pas de spins électroniques et l'élément comportant la plus grande proportion de spins nucléaires est l'isotope ^{89}Y (I = 1/2) dont l'abondance naturelle est de 100 %. Son moment magnétique est cependant faible, ce qui permet d'observer un bruit magnétique réduit dans ce cristal.
La croissance des cristaux de Y_2SiO_5 se fait à partir d'oxydes de départ de haute pureté (> 99,99 %) en utilisant le procédé Czochralski, dans lequel une boule cristalline est tirée à partir d'un germe monocristallin précisément orienté plongé dans un bain fondu. Ce procédé est communément utilisé pour la croissance du silicium et de cristaux pour des applications dans les lasers ou l'optique non linéaire. La température de fusion de Y_2SiO_5 est d'environ 2000 °C, ce qui nécessite l'utilisation de creusets résistants à de hautes températures comme l'iridium et de montages thermiquement isolants à base de matériaux réfractaires du type zircone. La vitesse

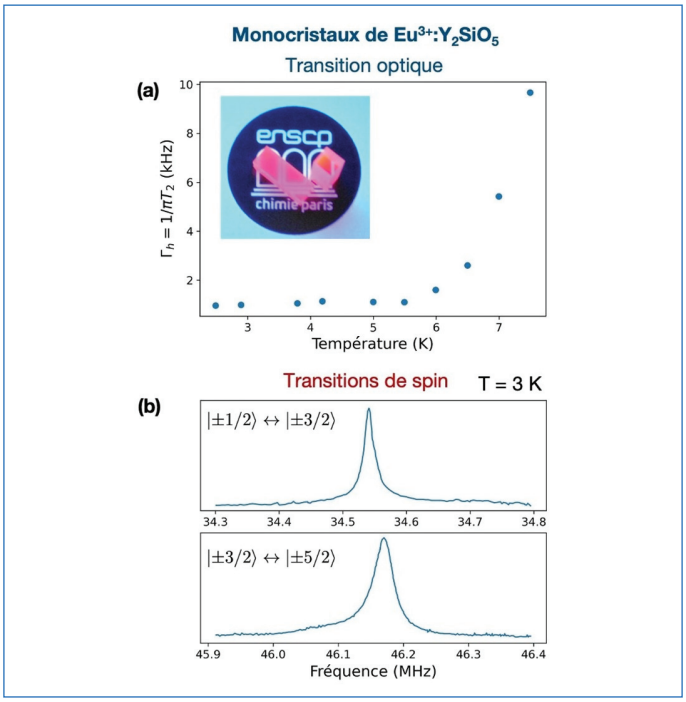


Figure 2 - Cristaux massifs de Eu^{3+}:Y_2SiO_5. (a) Variation du temps de vie des états quantiques optiques (T_2) en fonction de la température. La figure représente la quantité $\Gamma_h = 1/\pi T_2$ appelée largeur homogène. T_2 diminue rapidement au-dessus de 5,5 K, ce qui explique la nécessité de travailler à très basse température. En insert : échantillons de qualité optique orientés et polis. La fluorescence rouge est due aux ions Eu^{3+}. (b) Transitions de spin nucléaire du niveau fondamental de $^{151}Eu^{3+}$. Le signal de spin est détecté optiquement et est un exemple de la possibilité de contrôle optique des spins dans le contexte des interfaces quantiques lumière-matière.

de croissance est de l'ordre de 1 mm/h et est régulée par ordinateur dans les différentes phases de croissance.
Ce procédé permet d'obtenir des cristaux de grande qualité, exempts de bulles, de phases parasites ou d'inclusions et parfaitement adaptés à des expériences de spectroscopie des états quantiques. Ces dernières font intervenir des sources laser de grande pureté spectrale, divers dispositifs opto-électroniques et des réfrigérateurs fonctionnant en-dessous de 3 K. Des expériences spécifiques, notamment inspirées des séquences d'impulsions de la RMN, permettent de créer et de manipuler des états de superposition et d'en déterminer les durées de vie. Ces dernières peuvent dépasser plusieurs ms pour les transitions optiques de Er^{3+} sous fort champ magnétique (7 T) et à 1,4 K [4]. Ce sont les plus longs T_2 optiques observés dans un solide – environ six ordres de grandeur plus longs que pour des émetteurs quantiques comme les centres azote-lacune (NV en anglais) dans le diamant. Les transitions de spin peuvent également présenter des T_2 très longs : dans Eu^{3+}:Y_2SiO_5, un temps de cohérence dépassant 10 h a été obtenu sous un champ magnétique précis et en appliquant des techniques de contrôle des états quantiques [5]. Ces résultats conduisent à des démonstrations dans le domaine des mémoires quantiques. Celles-ci peuvent enregistrer l'information quantique portée par la lumière en absorbant un photon unique, stocker cette information dans une transition optique ou la transférer dans un état de spin, et enfin générer à nouveau un photon unique dont l'état quantique est identique au premier [3]. De telles mémoires, nécessaires aux communications quantiques à longue distance, ont été démontrées pour des états intriqués dans un cristal de Pr^{3+}:Y_2SiO_5 en 2021 [6].

Un effort considérable est actuellement consenti dans des laboratoires universitaires ou industriels (MemQ - E.-U., Thales RT - France...)

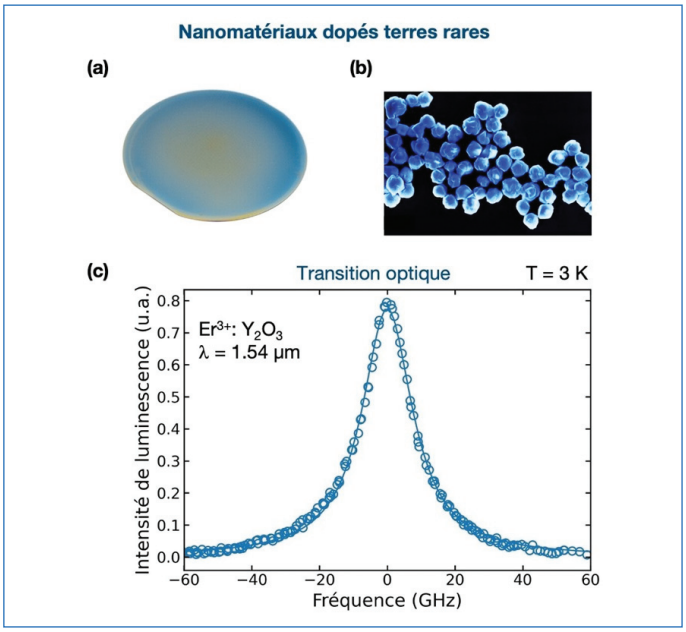


Figure 3 - Nanomatériaux pour les technologies quantiques : (a) Film mince (500 nm) de Eu^{3+}:Y_2O_3 obtenu par dépôt chimique en phase vapeur (CVD) sur un substrat de silicium de 2 pouces de diamètre. (b) Nanoparticules (environ 400 nm de diamètre) de Eu^{3+}:Y_2O_3 obtenues par décomposition lente en solution. (c) Transition optique observée dans un film de Er^{3+}:Y_2O_3 déposé sur un substrat de diamant à la longueur d'onde de 1,54 µm. Sa faible largeur spectrale (18 GHz, soit 0,14 nm) montre la bonne qualité cristalline de ce film.

pour transposer les excellentes propriétés des matériaux massifs à des nanoparticules [7], des films minces [8,9] ou encore des cristaux moléculaires [10], afin de réaliser des puces photoniques quantiques dans lesquelles des terres rares sont couplées à des guides d'ondes ou des résonateurs quantiques (*figure 3*). Ceci permettrait d'obtenir des dispositifs compacts et efficaces, offrant de nombreuses fonctionnalités quantiques : mémoires, sources de photons et processeurs.

[1] S. Wehner, D. Elkouss, R. Hanson, Quantum internet: a vision for the road ahead, *Science*, **2018**, *362*, eaam9288, https://doi.org/10.1126/science.aam9288
[2] D. D. Awschalom, R. Hanson, J. Wrachtrup, B. B. Zhou, Quantum technologies with optically interfaced solid-state spins, *Nature Photon.*, **2018**, *12*, p. 516-27, https://doi.org/10.1038/s41566-018-0232-2
[3] P. Goldner, A. Ferrier, O. Guillot-Noël, Chap. 267 - Rare earth-doped crystals for quantum information processing, in *Handbook on the Physics and Chemistry of Rare Earths, vol. 46*, J.-C.G. Bünzli, V.K. Pecharsky (eds), Elsevier, **2015**, pp. 1-78, https://doi.org/10.1016/B978-0-444-63260-9.00267-4
[4] T. Böttger, C. W. Thiel, R. L. Cone, Y. Sun, Effects of magnetic field orientation on optical decoherence in Er^{3+}:Y_2SiO_5, *Phys. Rev. B*, **2009**, *79*, 115104, https://doi.org/10.1103/PhysRevB.79.115104
[5] F. Wang *et al.*, Nuclear spins in a solid exceeding 10-hour coherence times for ultra-long-term quantum storage, *PRX Quantum*, **2025**, *6*, 010302, https://doi.org/10.1103/PRXQuantum.6.010302
[6] D. Lago-Rivera, S. Grandi, J. V. Rakonjac, A. Seri, H. de Riedmatten, Telecom-heralded entanglement between multimode solid-state quantum memories, *Nature*, **2021**, *594*, p. 37-40, https://doi.org/10.1038/s41586-021-03481-8
[7] S. Liu *et al.*, Defect engineering for quantum grade rare-earth nanocrystals, *ACS Nano*, **2020**, *14*, p. 9953-62, https://doi.org/10.1021/acsnano.0c02971
[8] P. Goldner, A. Tallaire, D. Serrano, A. Tiranov, T. Zhong, Rare-earth doped thin films for optical quantum technologies, *Adv. Quantum Technol.*, **2025**, *8*, e2500026, https://doi.org/10.1002/qute.202500026
[9] I. G. Balaşa *et al.*, Rare earth-Diamond hybrid structures for Optical Quantum Technologies, *Adv. Opt. Mater.*, **2024**, 2401487, https://doi.org/10.1002/adom.202401487
[10] D. Serrano *et al.*, Ultra-narrow optical linewidths in rare-earth molecular crystals, *Nature*, **2022**, *603*, p. 241-46, https://doi.org/10.1038/s41586-021-04316-2

Cette fiche a été préparée par **Philippe GOLDNER** (philippe.goldner@chimieparistech.psl.eu), directeur de recherche, **Diana SERRANO**, chargée de recherche, et **Alexandre TALLAIRE**, directeur de recherche, à l'Institut de Recherche de Chimie Paris, Chimie ParisTech, CNRS, Université PSL, 11 rue Pierre et Marie Curie,75005 Paris.

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

Complétez votre collection et abonnez-vous

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

Abonnez-vous pour un an (numéros spéciaux inclus)

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

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

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

Numéros spéciaux

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

Dernières parutions :

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



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

Dernières parutions :

- Chimie et habitat (octobre 2026) : 25 €
- 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 €



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



Bon de commande

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

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

Mode de règlement

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

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

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

Village de la Chimie

des sciences de la nature et de la vie

2 JOURS POUR SAUVER LA PLANÈTE !

ET DÉCOUVRIR TON FUTUR MÉTIER

70 ENTREPRISES

35 ÉCOLES

15 CONFÉRENCES

35 ANIMATIONS



24e ÉDITION

03 & 04 MARS 2027

villagedelachimie.org

PARIS MONTREUIL EXPO

128 RUE DE PARIS - 93100 MONTREUIL

ENTRÉE LIBRE

MERCREDI 03 MARS 9H - 17H

JEUDI 04 MARS 9H - 17H

MINISTÈRE DE L'ÉDUCATION NATIONALE ET DE LA JEUNESSE

FRANCE CHIMIE ÎLE-DE-FRANCE

RÉPUBLIQUE FRANÇAISE

France Travail

AVEC L'INDUSTRIE

Harmonie mutuelle GROUPE VYV AVANÇONS collectif

FRANCE CHIMIE

GROUPE APICIL

Mouvement des Entreprises de France Île-de-France

opco 2i COMPÉTENCES INDUSTRIES

OCIRP protéger. agir. soutenir

MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE