

Sommaire

Eviter les hallucinations de l'IA dans la recherche en biologie	
Thomas Burger	p.2
Recyclage du Nafion : une approche durable pour les piles à combustible	
Hakima Mendil-Jakani	p.4
Vers la conception de matériaux auto-assemblés et bio-dirigés par l'ADN	
Didier Gasparutto	p.6
Des ionophores sélectifs de Cu^+ pour la thérapie anti-cancéreuse	
Aurélien Deniaud & Giulia Veronesi	p.7
Projet ATHENA / X-IFU : record de stabilité à très basse température (50 mK) pour l'observation du cosmos	
Anthony Attard	p.8
Quand l'uranium perturbe la régulation génétique des plantes	
Claude Alban	p.9
Matériaux antiferromagnétiques octaédriques : complexité émergente sous champ magnétique	
Michaël Zhitomirsky	p.10
Film d'un photorécepteur à vitamine B12 en action	
Martin Weik	p.12
Espoir face à la prématurité : un projet essentiel de santé infantile	
Nadia Alfaidy - Benharouga	p.13
Un excès de courant efface la mémoire	
Gilles Gaudin	p.15
Combattre le côté obscur de l'hypersensibilité en RMN	
Sabine Hediger et Gaël De Paëpe	p.16

Communiqués - Prix - Media	
Autres résultats scientifiques des labos	p.18

Eviter les hallucinations de l'IA dans la recherche en biologie

Thomas Burger

Laboratoire Biosciences et Bioingénierie pour la santé



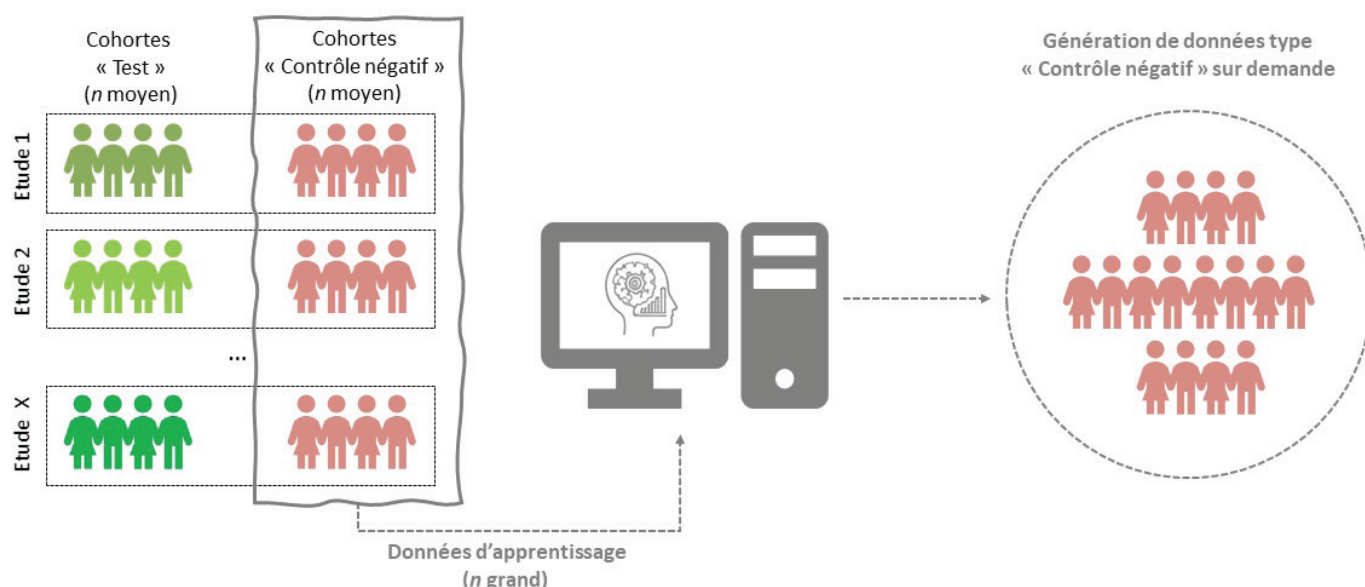
L'intelligence artificielle générative est de plus en plus utilisée dans la recherche, cependant elle produit parfois des hallucinations. Comment empêcher les découvertes scientifiques de se retrouver ainsi corrompues ?

Image générée par IA

L'avènement récent de l'**intelligence artificielle générative*** a déjà révolutionné nos vies et nos sociétés, grâce à des outils tels que Chat-GPT ou Gemini. Pour l'instant, l'IA générative est utilisée essentiellement pour générer des données multimédias (édition de texte, résumé, retouche photo, génération de vidéos, etc.). Cependant, dans un avenir proche, elle pourra aussi générer des données plus techniques, telles que celles produites expérimentalement dans les laboratoires de recherche universitaires. Cela aura des conséquences sans précédent sur la production de connaissances scientifiques, qu'il convient d'anticiper, notamment parce que l'IA peut **halluciner***.

La complexité de la biologie moléculaire est telle que, dans la masse des données correspondantes, de minuscules hallucinations pourraient passer inaperçues, conduisant à des conclusions erronées (par exemple, un biomarqueur inexistant) avec des conséquences dévastatrices, telles que la corruption de la littérature scientifique ou telles que le financement d'essais cliniques sans intérêt. Cependant, interdire l'IA générative dans la recherche scientifique priverait les communautés scientifiques et médicales d'outils puissants. Pour faire face à ce dilemme, les chercheurs du CEA-Irig ont proposé de répertorier divers cas d'utilisation où l'IA peut être utilisée en toute fiabilité grâce

à une politique d'atténuation des risques adéquate. Leurs travaux présentent une dizaine de cas d'usage classés en trois catégories : i) La génération de nouvelles hypothèses, ii) la génération de nouvelles données et iii) l'amélioration des logiciels de biologie computationnelle.



Exemple de cas d'usage. © CEA

Compléter une cohorte en générant des données supplémentaires sur des patients dans le groupe de patients malades (en vert ou groupe « test ») serait très risqué, car toute hallucination non détectée conduirait à une représentation biaisée de la maladie. À l'inverse, compléter le groupe de patients sains (en rouge) qui sert de contrôle dans l'étude peut être conforme à une politique d'atténuation des risques : premièrement, parce que les hallucinations non détectées entraîneraient ici une plus grande diversité au sein du groupe de contrôle, ce qui est connu pour être un moyen efficace de limiter les risques de fausses découvertes. Ensuite, parce que les patients sains ont été admis plus fréquemment dans les études de cohorte, de sorte que les données potentiellement disponibles pour entraîner l'IA sont plus importantes, plus robustes et plus cohérentes. Cet exemple illustre comment un algorithme d'IA générative donné, adapté à une tâche donnée, peut être utilisé de différentes manières, avec une exposition différente aux risques induits par les hallucinations.

Bien qu'elles ne soient pas exhaustives, ces utilisations constituent une première base pour une intégration correcte de l'IA générative dans la démarche scientifique, car elles incitent les chercheurs à adopter un regard critique sur son utilisation.

***Intelligence Artificielle Générative** fait référence à des algorithmes qui sont capables non seulement d'analyser des données et de prendre des décisions ou de faire des prédictions, comme les outils classiques d'intelligence artificielle (IA), mais qui peuvent également générer de nouvelles données.

***Hallucinations** : se produisent lorsqu'une IA générative répond à une requête (aussi appelée « prompt ») en générant des détails qui semblent plausibles à certains égards, mais qui sont soit erronés (par exemple, une référence à un article inexistant), soit impossibles selon certaines contraintes du monde réel qui sont ignorées par l'IA générative (par exemple, le président américain Abraham Lincoln commentant l'internet, comme dans l'illustration en tête d'article).

Tutelles UMR : UGA, CEA, CNRS et INSERM

Financements : Projets Agence Nationale de la Recherche : ProFI GRAL CBH ; France 2030 ; PeptidOMS ; ProteoVir.

REFERENCE

BURGER T.

Keeping generative artificial intelligence reliable in omics biology
Patterns 2026

Recyclage du Nafion : une approche durable pour les piles à combustible

Hakima Mendil-Jakani

Laboratoire Systèmes Moléculaires et nanoMatériaux pour l'Énergie et la Santé



Face aux enjeux climatiques actuels, la décarbonation des systèmes énergétiques constitue un défi majeur. Dans ce contexte, les **piles à combustible*** apparaissent comme une technologie prometteuse, notamment pour des applications de mobilité et de production d'électricité à faibles émissions locales. Le déploiement de cette technologie repose sur l'utilisation de membranes échangeuses de protons, telles que le **Nafion***.

En combinant **cinétique de gonflement***, diffusion de neutrons et de rayons X, des chercheurs du **CEA-Irig (SyMMES, MEM)** et du CEA-Liten (DTNM), ont élucidé les mécanismes de dispersion du Nafion. Cette avancée ouvre de nouvelles perspectives pour le recyclage durable des membranes de piles à combustible.

Les membranes Nafion sont au cœur des piles à combustible, mais leur fabrication reste coûteuse. Par ailleurs l'usage de polymères fluorés reste problématique pour la santé et l'environnement et aucun procédé industriel de recyclage n'existe à ce jour, ce qui constitue un défi majeur.

Cette étude propose une méthode innovante utilisant des liquides ioniques (sels liquides non volatils, composés uniquement d'ions et dont les propriétés peuvent être modulées selon l'application), pour disperser la membrane puis la récupérer. Une analyse mul-

ti-échelle (cinétique de gonflement macroscopique, diffusion de neutrons et de rayons X) a permis de décrypter le mécanisme de gonflement menant à la dispersion et d'identifier les meilleurs candidats pour le recyclage de ces membranes.

Nous montrons qu'une membrane Nafion peut être dispersée dans des liquides ioniques, puis récupérée par précipitation et lavage. Le Nafion est restauré sous sa forme solide, constituant une première preuve de concept de recyclage en boucle fermée par l'utilisation de ces

systèmes en tant que solvant. Une démarche multi-échelle combinant cinétique de gonflement, diffusion de la lumière, des neutrons et des rayons X a permis de décrypter la nature et la séquence des interactions, des premiers stades du gonflement jusqu'à la dispersion — gonflement des domaines ioniques, dilution des agrégats polymériques et plastification — et d'identifier les familles de liquides ioniques les plus prometteuses pour le recyclage.

Cette étude établit une preuve de concept du recyclage du Nafion en milieu liquide ionique et complète des travaux sur une nouvelle voie de recyclage des assemblages membrane-électrodes issus des piles à combustible. Un autre objectif sera d'étendre le procédé aux membranes vieillies ou alternatives au Nafion.

Tutelles

Univ. Grenoble Alpes, CEA, CNRS, Grenoble INP – UGA

Collaborations

- Université Grenoble Alpes
- Institut Laue Langevin
- ICGM, Université de Montpellier, CNRS, ENSCM, Montpellier

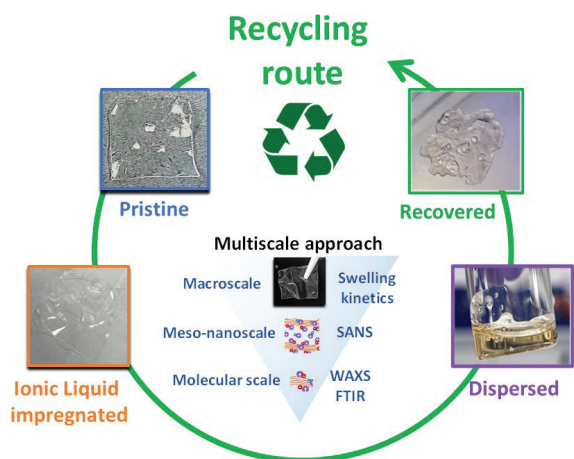
Financements

- PTC MP

***pile à combustible** : dispositif électrochimique qui produit de l'électricité en convertissant l'énergie chimique d'un combustible en énergie électrique, par des réactions aux électrodes et le transport de protons à travers un électrolyte (membrane).

***Nafion** : polymère fluoré utilisé comme membrane échangeuse de protons dans les piles à combustible largement employé pour ses performances électrochimiques.

***cinétique de gonflement** : mesure de la variation temporelle de la masse et du volume d'un matériau liée à l'absorption de liquide.



Une nouvelle route de recyclage du Nafion en milieu liquide ionique
© CEA

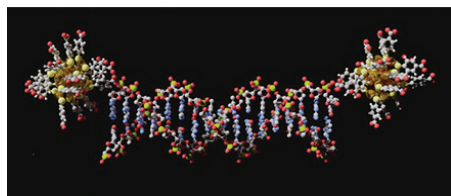
REFERENCE

FERNÁNDEZ RODAS A. C, PILUSO P, POUGET S, DEMÉ B, AMEDURI B, GEBEL G and MENDIL-JAKANI H. Ionic Liquids: A Novel Route for Sustainable Recycling of Nafion from Proton Exchange Membrane Fuel Cells *ACS Sustainable Chemistry & Engineering* 2025

Vers la conception de matériaux auto-assemblés et bio-dirigés par l'ADN

Didier Gasparutto

Laboratoire Systèmes Moléculaires et nanoMatériaux pour l'Énergie et la Santé



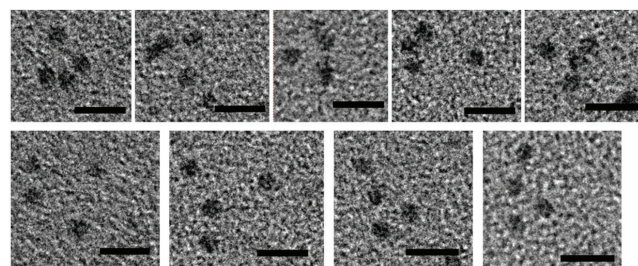
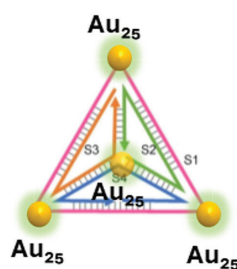
Les **nanomatériaux photoniques*** suscitent un intérêt croissant en biologie et médecine en raison de leur potentiel en bio-détection et bio-imagerie, au sein de dispositifs implantables ou comme agents thérapeutiques. Dans cette optique, un consortium de chercheurs du

CEA-Irig et de l'Institut pour l'Avancée des Biosciences de Grenoble (IAB) ont développé des nano-architectures photoniques à base de nanoclusters d'or fonctionnalisés et auto-assemblés par l'ADN.

La conception d'architectures optiquement actives à base de nanoclusters d'or (AuNCs) a connu un grand engouement au cours de ces dernières années. Ces architectures constituent une nouvelle classe de particules ultra-petites (<3 nm) connues pour leur photoluminescence, leur photo-stabilité et une biocompatibilité élevée.

Dans le cadre de ce projet collaboratif, les chercheurs ont relevé le challenge de conjuguer des fragments d'ADN aux AuNCs avec une stœchiométrie totalement contrôlée. Pour cela, ils ont développé une ingénierie des ligands et une fonctionnalisation contrôlée de l'ADN pour des nanoclusters de tailles définies, leur permettant de construire des assemblages unidimensionnels (1D) de nanoclusters ainsi que des architectures tridimensionnelles (3D). Leur caractérisation, combinant un ensemble d'approches analytiques, structurales et d'analyses optiques, a montré une reproductibilité et un rendement d'assemblage élevés de ces superstructures.

Ces travaux établissent une base synthétique et analytique primordiale pour la fabrication, avec de hauts rendements et une grande pureté, de nano-architectures photoniques multidimensionnelles définies. Ces plateformes biohybrides ouvrent des perspectives particulièrement intéressantes pour leurs applications comme **agents théranostiques*** originaux.



(g.) Représentation schématique d'un tétraèdre d'ADN fonctionnalisé par 4 nanoclusters d'or à ses sommets. (d.) Images de Microscopie Electronique à Transmission (TEM) des nanostructures tétraédriques hybrides ADN-nanoclusters (échelle = 5nm). © CEA

Tutelles

Univ. Grenoble Alpes, CEA, CNRS, Grenoble INP - UGA

Financements

- UGA (CBH-EUR),
- ANR,
- Labex Arcane et Labex Gral,
- CEA-PTC

Collaborations

- CEA-Irig / IBS
- Institut pour l'Avancée des Biosciences

***nanomatériaux photoniques :** matériaux de dimensions proches des longueurs d'onde de la lumière visible qui interagissent avec cette dernière.

***agents théranostiques :** molécules ou nanomatériaux utilisés pour l'imagerie (diagnostic) et/ou la thérapie (thérapeutique).

REFERENCE

Alhalabi A, Saint-Pierre C, Boeri-Erba E, Elchinger P.-H, Kaur H, Gasparutto D and Le Guevel X. Designing atomically precise gold nanocluster architectures with DNA-guided self-assembly and biofunctionalization approaches *Nanoscale* 2025

Des ionophores sélectifs de Cu⁺ pour la thérapie anti-cancéreuse

Aurélien Deniaud & Giulia Veronesi

Laboratoire Chimie et Biologie des Métaux

Le cuivre est un oligoélément essentiel pour l'homme dont l'utilisation est optimisée dans certaines cellules cancéreuses. Des chercheurs du **CEA-Irig/LCBM** et de l'Université Libre de Bruxelles ont développé une nouvelle famille de composés capables de redistribuer le cuivre intracellulaire, ce qui leur confère une activité anti-cancéreuse.

Le cuivre est un élément trace essentiel pour l'homme utilisé pour de nombreuses fonctions physiologiques. Etant donné la grande toxicité du cuivre libre, son transport et son stockage sont très finement régulés dans nos cellules. Au cours de la dernière décennie, le cuivre a été montré comme jouant un rôle important dans la tumorigenèse. Différentes thérapies anti-cancéreuses jouant sur le cuivre sont actuellement en cours de développement.

Les chercheurs du CEA-Irig, de l'Institut pour l'Avancée des Biosciences et de l'Université Libre de Bruxelles, ont développé une nouvelle famille de molécules capables de transporter sélectivement à travers une membrane biologique les ions cuivre portant une seule charge positive (Cu⁺) qui correspond à la forme intracellulaire du cuivre [1,2]

(Figure a-b). Certains composés de cette famille ont montré une activité anti-cancéreuse sur des cellules en culture. Le Cuphoralix a ainsi été identifié comme la meilleure molécule synthétisée par l'équipe de l'ULB (Figure a) [2,3]. L'expertise des chercheurs du CEA-IRIG sur l'**homéostasie du cuivre*** a permis d'élucider le mécanisme d'action du Cuphoralix dans des cellules cancéreuses du foie. En collaboration avec des chercheurs du synchrotron ESRF à Grenoble, des expériences de nano-imagerie élémentaire ont montré que le Cuphoralix induit une redistribution du cuivre dans les cellules cancéreuses qui en meurent empoisonnées (Figure c-d).

La sélectivité de molécules comme le Cuphoralix développées pour le transport de Cu⁺ a permis de découvrir un mécanisme d'action anti-cancé-

reux totalement inédit. En effet, les mécanismes de résistance développés par les cellules sont très limités puisque le Cuphoralix n'a pas de cible intracellulaire spécifique, ce qui le rend également actif contre tous les types de cellules cancéreuses testés jusqu'à présent : les modèles résistants ou non, et ceux avec ou sans phénotype agressif. Tous ces éléments font du Cuphoralix une molécule très prometteuse pour la thérapie anti-cancéreuse.

*** L'homéostasie du cuivre** correspond à l'ensemble des mécanismes permettant de maintenir la concentration et la distribution intracellulaire du cuivre appropriées.

REFERENCES

[1] Renier N. et al.
Transmembrane transport of copper(I) by imidazole-functionalised calix[4]arenes
Chem. Com. 2020

[2] Renier N. et al.
Potent Biological Activity by a Synthetic Cu(I) Cationophore Redistributing Intracellular Copper Pools
JACS 2025

[3] Busser et al.
Brevet EP23305100.2. 2023

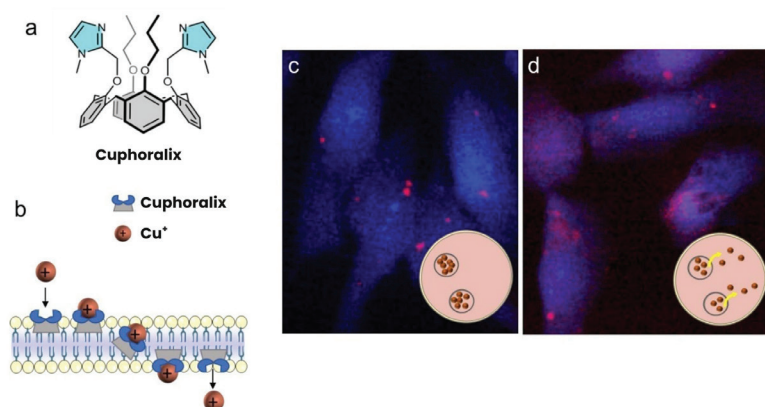


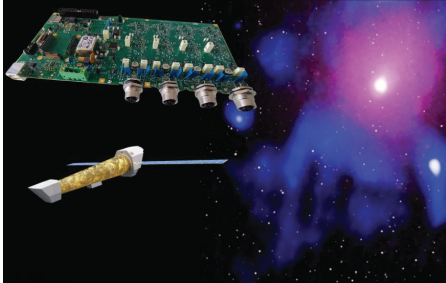
Figure : a) Structure du Cuphoralix. b) Mécanisme du transport des ions Cu⁺ à travers une bicouche lipidique par le Cuphoralix. c-d) Images de microscopie de fluorescence des Rayons X permettant de visualiser la distribution du potassium (bleu) et du cuivre (rouge) dans des cellules de cancer du foie exposées à 10 µM Cu (c) ou à 10 µM Cu et 100 nM Cuphoralix (d).

Ces cartes montrent que le cuivre est physiologiquement stocké à haute concentration dans des vésicules intracellulaires (c, spots rouge intense) et le Cuphoralix empêche ce stockage conduisant à une redistribution du cuivre dans toute la cellule avec des concentrations locales 10 fois plus faibles (d). Les encarts montrent une représentation schématisée de la localisation du cuivre dans les cellules. © CEA

Projet ATHENA / X-IFU : record de stabilité à très basse température (50 mK) pour l'observation du cosmos

Anthony Attard

Département des Systèmes Basses Températures



Le projet ATHENA, un observatoire spatial développé par l'ESA pour explorer les mystères du cosmos, sera équipé de l'instrument X-IFU dédié à la détection des rayons X. Dans ce cadre, les équipes du **CEA-Irig/DSBT** ont joué un rôle clé en concevant le système de refroidissement haute précision capable de maintenir l'instrument à une température stable de 0,05 K (très proche du zéro absolu).

ATHENA (Advanced Telescope for High-ENERgy Astrophysics) est le futur satellite européen d'observation spatiale opérant dans le domaine des rayons X. Il permettra l'étude des phénomènes les plus extrêmes observables dans l'Univers, comme les amas de galaxies et les trous noirs supermassifs, avec un niveau de détail et une sensibilité exceptionnelle. Conçu par l'Agence Spatiale Européenne (ESA) le satellite embarquera un instrument de détection des rayons X, nommé X-IFU.

Les équipes du **CEA-IRIG/DSBT** et du CEA-IRFU/DAP ont travaillé en collaboration pour réaliser une électronique de mesure de température compatible avec les contraintes particulières de l'espace. Durant ces dernières années, le DSBT a mis au point l'instrumentation permettant d'alimenter le capteur par un

courant extrêmement faible (seulement 2 nA) afin d'éviter tout échauffement parasite par effet joule.

De plus, l'instrumentation est équipée aussi d'une chaîne d'amplification à très faible bruit conçue afin de garantir la stabilité de la mesure du capteur de température à 0,8 μ K en sensibilité.

La carte électronique (**voir figure**) a ensuite été mise en œuvre dans un cryostat spécifique contenant plusieurs étages de refroidissement développé par le DSBT pour atteindre la très basse température de 50 mK.

Le résultat obtenu est encore meilleur que celui exigé par le CNES puisque la stabilité mesurée pendant plus de 10 heures a atteint le record de 0.4 μ K.

La carte électronique et son coffret de commande seront livrés prochainement au Centre National d'Etudes Spatiales (CNES) pour caractériser le système complet incluant l'instrument X-IFU. De leur côté, les équipes du CEA-IRFU poursuivront le développement spécifique de l'électronique qui sera adaptée pour résister aux conditions de l'espace endurées par le satellite ATHENA et valider ces performances sur le modèle de vol.

Tutelles UMR : CEA, UGA

Financements : CNES

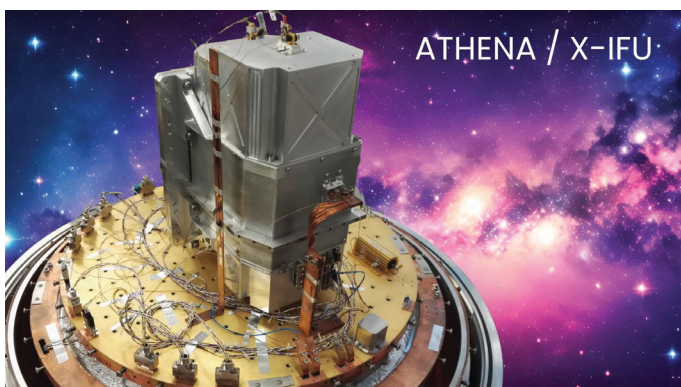
Collaborations : CEA-IRFU/DAP

REFERENCE

Duval J-M, Attard A. and Brasiliano D.A.P.

Experimental results of ADR cooling tuned for operation at 50 mK or higher temperature.

Cryogenic Engineering Conference 2020

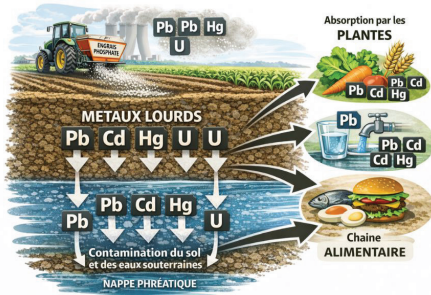


A gauche, le cryostat dédié à l'étude de X-IFU. A droite, la carte électronique Très Basse Température. © CEA.

Quand l'uranium perturbe la régulation génétique des plantes

Claude Alban

Laboratoire Physiologie Cellulaire & Végétale



Des protéines végétales capables de lier l'uranium *in vivo* ont été identifiées, dont la protéine GRP7 pour qui la capacité à se lier à l'ARN est bloquée, révélant un tout nouveau mécanisme de toxicité.

Image générée par IA

L'uranium (**radionucléide*** naturel) est un contaminant environnemental présent dans certains sols et eaux, notamment à proximité d'activités minières ou nucléaires. Son accumulation peut entraîner des risques potentiels pour les écosystèmes, les agrosystèmes et la santé humaine, car le radionucléide a des effets toxiques chimiques.

Chez les plantes, ses effets toxiques sont connus, mais les mécanismes moléculaires impliqués restent mal compris. Cette étude, portée par des chercheurs du **CEA-Irig/LPCV** et autres collaborateurs, apporte une avancée majeure avec l'identification directe des protéines cellulaires ciblées par l'uranium, permettant la mise en évidence d'un nouveau mécanisme de toxicité de l'uranium chez les plantes.

Grâce à une approche de **métalloprotéomique*** intégrée combinant chromatographie, spectrométrie de masse et RMN, les chercheurs ont identifié à partir d'extraits cellulaires d'*Arabidopsis thaliana* 57 protéines capables de se lier à l'uranium. L'une d'elles, GRP7, joue un rôle clé dans la régulation des ARN. L'étude montre que l'uranium se fixe sur deux sites précis de cette protéine et empêche son interaction normale avec les acides nucléiques, perturbant ainsi la régulation de l'expression des gènes.

Ce travail révèle un mécanisme moléculaire inédit de toxicité de l'uranium chez les plantes. Il ouvre des perspectives pour mieux évaluer les risques environnementaux et développer des stratégies de dépollution des sols par les plantes (phytoremédiation).

Tutelles UMR

Univ. Grenoble Alpes – INRAE – CEA – CNRS

Collaborations

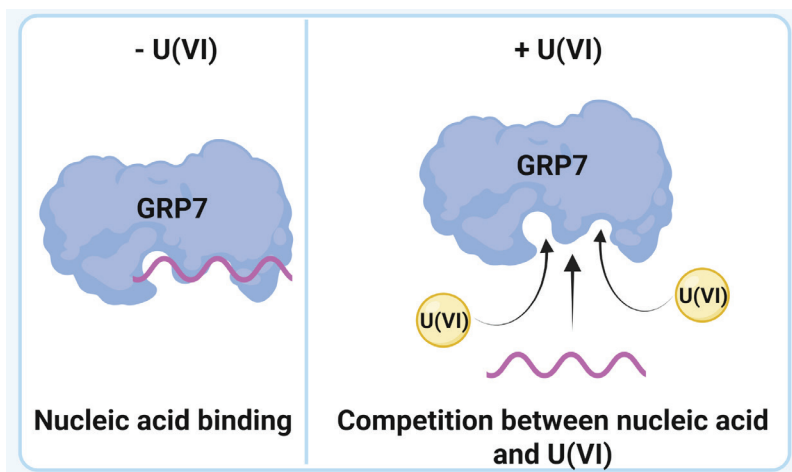
- CEA-Irig : IBS, BGE et LCBM
- Laboratoire de Spectrométrie de Masse BioOrganique, Université de Strasbourg.

Financements

- Agence Nationale de la Recherche GreenU ; ANR-17-EURE-0003, CBH-EUR-GS; ANR-10-INBS-08-3
- the French Proteomics Infrastructure (ProFI)

***Radionucléide:** atome radioactif.

***Approche métalloprotéomique** permet l'étude de l'ensemble des protéines contenant un ou plusieurs ions métalliques d'un organisme ou extrait cellulaire.



REFERENCE

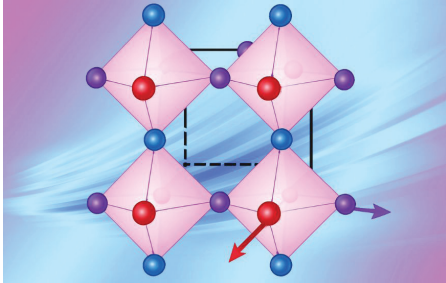
Benoît H. Revel et al.
Identification of uranyl-binding proteins in *Arabidopsis thaliana* cells exposed to uranium: Insights from a metalloproteomic analysis and characterization of Glycine-Rich RNA-binding protein 7 (GRP7)
Journal of Hazardous Materials
2025

Pour la protéine GRP7, l'étude révèle que la forme ionisée d'uranium U(VI) se fixe sur deux sites, et interfère avec la liaison des ARN, perturbant ainsi la régulation génique médiée par cette protéine. Cela révèle un tout nouveau mécanisme de toxicité de l'uranium chez les plantes. © CEA

Matériaux antiferromagnétiques octaédriques : complexité émergente sous champ magnétique

Michaël Zhitomirsky

Laboratoire PHotonique ELectronique et Ingénierie Quantiques



Les chercheurs du Laboratoire **CEA-Irig/Pheliqs** et de l'Institut Laue-Langevin de Grenoble ont proposé une nouvelle famille de matériaux **magnétiques frustrés*** basée sur des unités octaédriques de spin. Ces nouveaux matériaux présentent des diagrammes de phase complexes et fascinants. Des simulations numériques sur un modèle de spin réaliste pour les **antiferromagnétiques*** octaédriques ont permis d'obtenir un diagramme de phase unique sous champ magnétique appliqué.

La frustration géométrique, qui se produit lorsque la géométrie du réseau empêche les spins de satisfaire simultanément toutes les interactions, est à l'origine d'états magnétiques quantiques et classiques exotiques. Les composés magnétiques frustrés sont également des matériaux prometteurs pour les applications **magnétocaloriques***, notamment en tant qu'élément frigorigène permettant de stocker de l'entropie. Si les réseaux à base de triangles et de tétraèdres, comme le réseau kagomé ou le réseau pyrochlore (voir **figure 1**), ont fait l'objet de nombreuses études, les réseaux tridimensionnels d'octaèdres constituent une classe distincte et encore peu explorée. On trouve de telles structures cristallines dans les antiperovskites, comme Eu_3PbO , Mn_3Pt ou certains alliages cubiques à faces centrées.

Ce travail présente les antiferromagnétiques octaédriques comme une nouvelle classe de composés géométriquement frustrés, dont le réseau cristallin est composé d'octaèdres d'ions magnétiques. L'étude théorique du diagramme de phase champ magnétique (H) - température (T) dans le réseau octaédrique à arêtes partagées, totalement frustré, a révélé une séquence remarquablement riche de huit phases antiferromagnétiques successives, stabilisées par des fluctuations thermiques (**figure 2**). Il s'agit d'un exemple intéressant de sélection entropique entre différents types d'ordre magnétique. La complexité de ce diagramme, avec de multiples transitions de premier et de second ordre ainsi que l'apparition de **plateaux d'aimantation fractionnaire*** stables à $m = 1/3$ et $2/3$, est véritablement unique et dépasse la complexité

des diagrammes de phase des antiferromagnétiques kagomé et pyrochlore.

La richesse du diagramme de phase provient de la frustration des interactions entre les spins qui composent l'octaèdre. Dans un octaèdre unique, l'impossibilité de satisfaire simultanément 12 liaisons antiferromagnétiques provoque une dégénérescence considérable, bien supérieure à celle des triangles ou des tétraèdres de spin. En présence d'un champ magnétique, cette dégénérescence est partiellement levée, ce qui donne lieu à une variété d'arrangements de spins colinéaires et coplanaires. On peut citer par exemple, l'état magnétique $\uparrow\uparrow\uparrow\downarrow\downarrow$ au plateau $1/3$, ou la configuration $\uparrow\uparrow\uparrow\uparrow\downarrow$ au plateau $2/3$. Les simulations numériques réalisées par la méthode de Monte-Carlo ont pleinement validé ce modèle.

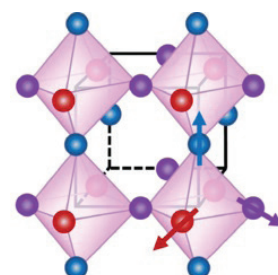
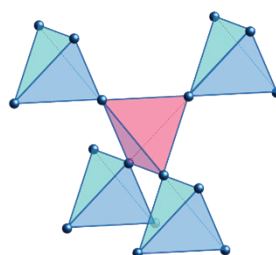
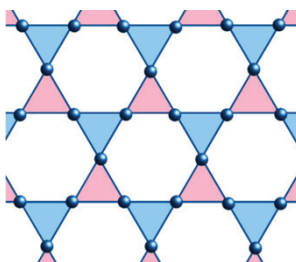


Figure 1 : Réseaux cristallins frustrés (de gauche à droite) : kagomé, pyrochlore et octaédrique.

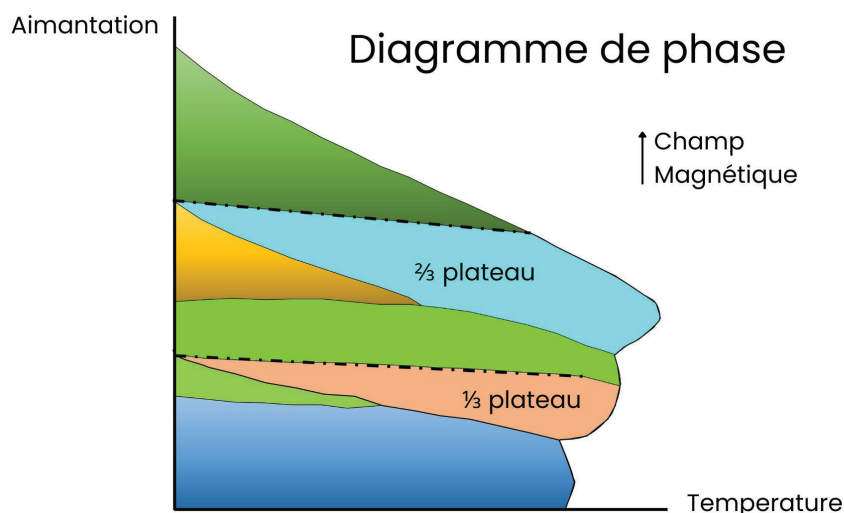


Figure 2 : Diagramme de phase d'un antiferromagnétique octaédrique dans un champ magnétique

Les résultats obtenus établissent les antiferromagnétiques octaédriques comme une nouvelle classe distincte d'aimants composés magnétiques géométriquement frustrés et une plateforme fertile pour l'exploration du magnétisme complexe, à l'interface entre les réalisations matérielles dans les anti-perovskites, comme par exemple Eu_3PbO , Eu_3SnO , $\text{Mn}_3\text{Pt}(\text{Ge})$, et les modèles théoriques. Ils établissent le lien direct entre la frustration de l'unité octaédrique à six spins et l'émergence de plateaux d'aimantation fractionnaires.

De plus, ils démontrent comment le mécanisme entropique (fluctuation) peut donner lieu non pas à un seul état ordonné, mais à une variété de phases à partir d'un état fondamental classique hautement dégénéré. Les résultats relient la physique des unités octaédriques locales et les états ordonnés à longue portée en trois dimensions, offrant de nouvelles perspectives pour l'exploration d'états exotiques dans les composés magnétiques frustrés et suggérant de nouvelles pistes pour trouver des matériaux magnétocaloriques appropriés.

Tutelles UMR : CEA – UGA – Grenoble INP

Financements : ANR Fresco (PI : Daniel Braithwaite, Pheliqs)

*Frustration géométrique :

Situation où les spins (aimants atomiques) ne peuvent pas tous s'aligner de manière stable à cause de la structure du réseau.

***Antiferromagnétique :** Matériau où les spins voisins sont orientés en sens opposés (contrairement aux ferromagnétiques, comme le fer).

***Plateaux d'aimantation fractionnaire :** Zones où l'aimantation reste constante (à $1/3$ ou $2/3$ de sa valeur maximale) malgré une variation du champ magnétique.

***Magnétocalorique :** Propriété de certains matériaux à chauffer ou refroidir sous l'effet d'un champ magnétique, utile pour des systèmes de réfrigération innovants

REFERENCE

A.S. Gubina, T. Ziman, and M. E. Zhitomirsky
Fully frustrated octahedral antiferromagnets: Emergent complexity in external field
Physical Review B 2025

Film d'un photorécepteur à vitamine B12 en action

Martin Weik

Institut de Biologie Structurale

La vitamine B12 est un **cofacteur organométallique*** présent dans de nombreuses enzymes qui contrôlent des processus essentiels dans divers organismes, y compris chez l'homme. Un consortium international dirigé par des scientifiques du **CEA-Irig/IBS** vient de combiner des techniques expérimentales afin de découvrir le fonctionnement moléculaire d'un prototype de **photorécepteurs*** à vitamine B12, CarH.

Il y a dix ans, il a été découvert avec surprise que les dérivés de la vitamine B12 sont utilisés pour la détection de la lumière par une grande famille de photorécepteurs jusqu'alors inconnus chez les bactéries, qui remplissent diverses fonctions.

Un prototype de photorécepteurs à vitamine B12, CarH, régule par exemple l'expression des gènes impliqués dans la protection des bactéries contre un excès de lumière solaire. Il y parvient en se liant à l'ADN dans l'obscurité, agissant comme un butoir moléculaire. Lorsqu'il est exposé à la lumière, son architecture tétramérique se désagrège, permettant la transcription en se détachant de l'ADN.

Toutefois le fonctionnement moléculaire précis de ce photorécepteur et d'autres photorécepteurs à vitamine B12 est resté un mystère depuis lors. Un consortium international dirigé par des scientifiques du CEA-Irig/IBS vient de combiner des techniques expérimentales utilisant des lasers à électrons libres X (XFEL) en Suisse et au Japon, ainsi que le synchrotron ESRF à Grenoble, avec des calculs de chimie quantique afin d'élucider le fonctionnement moléculaire de CarH.

Après avoir déclenché la photoactivité chez CarH à l'aide d'une impulsion intense de lumière laser visible, les chercheurs ont observé les changements structuraux du photorécepteur en temps réel. Depuis les premiers instants suivant l'absorption de la lumière à l'échelle de la nanoseconde jusqu'à la perte de l'architecture tétramérique du photorécepteur, l'étude révèle la séquence d'événements moléculaires orchestrés qui sous-tendent son fonctionnement. De manière surprenante, les chercheurs ont découvert un état intermédiaire inattendu que le photorécepteur adopte de manière transitoire pendant le processus de réaction. Cet état serait destiné à protéger le photorécepteur contre le retour à son état initial et à le diriger vers la poursuite de la réaction. Un tel état intermédiaire n'a pas été observé chez les enzymes à vitamine B12, ce qui en fait une explication plausible de la capacité de détection de la lumière des photorécepteurs à vitamine B12.

Comprendre le fonctionnement de CarH au niveau moléculaire va permettre de modifier ce photorécepteur pour des applications biotechnologiques, telles que l'optogénétique, qui consiste à contrôler des processus cellulaires à l'aide de la lumière.

Tutelles UMR

Univ. Grenoble Alpes – CEA – CNRS

Collaborations

- Synchrotrons ESRF Grenoble et DLS (Angleterre)
- Universités : Manchester (Angleterre), Louisville (États Unis), Hyogo (Japon), Saarland (Allemagne)
- XFELs de l'Institut Paul Scherrer (Suisse)
- SACLA (Japon)

Financements

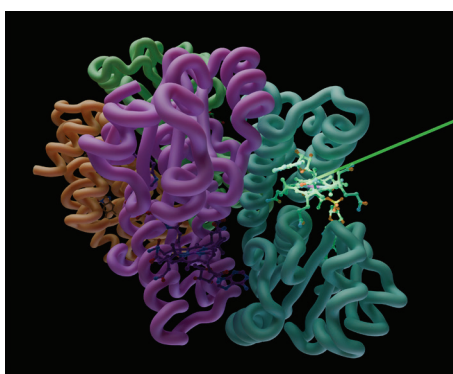
ANR, CNRS, Partenariat Hubert Curien, Sakura, et EPSRC.

***cofacteur organométallique :** molécule organique contenant un ou plusieurs ions métalliques, nécessaire à une enzyme pour catalyser une réaction donnée.

***photorécepteurs :** protéines sensibles à la lumière.

REFERENCE

Rios-Santacruz et al.
Integrated structural dynamics uncover new modes of B12 photoreceptor activation
Nature 2026



Une impulsion d'un laser intense photoexcite une molécule de vitamine B12 au sein du photorécepteur CarH. Les changements conformationnels qui s'en suivent mènent à la désintégration de son architecture tétramérique. © CEA

Espoir face à la prématurité : un projet essentiel de santé infantile

Nadia Alfaidy – Benharouga

Laboratoire Biologie et Biotechnologies pour la Santé



Image générée par IA

La prématurité reste aujourd'hui un défi majeur de santé publique. Face à ce constat, le Dr Nadia Alfaidy, directrice de recherche Inserm au laboratoire **Biosanté** du CEA-Irig, lance un projet ambitieux pour transformer le diagnostic et la prise en charge des grossesses à risque, grâce aux soutiens de la Fondation pour la Recherche Médicale (FRM) et du Pôle Universitaire d'Innovation (PUI) de l'Université Grenoble-Alpes.

La prématurité concerne environ 10 % des grossesses et représente la première cause de morbidité et mortalité néonatales. Dans ce contexte, l'équipe spécialisée du laboratoire de Biosanté dirigée par le Dr Nadia Alfaidy, mène d'intenses recherches depuis plus de vingt ans. Elle a identifié un facteur clé, la protéine PROK1, qui pourrait être utilisée comme un biomarqueur.

Ainsi, sous la coordination du Dr Nadia Alfaidy, un nouveau projet vise à valider l'utilisation de PROK1 comme outil de diagnostic précoce et à développer de nouvelles stratégies thérapeutiques pour mieux prévenir la prématurité.

Ce programme réunit un consortium d'experts issus de centres de recherche d'excellence :

- Pr Tiphaine Barjat (CHU de Saint-Étienne)
- Pr Mohamed Benharouga (Université Grenoble Alpes)
- Dr Laurent Chatre (CNRS – Université de Caen)
- Dr Mathilde Keck (CEA Saclay).



Image générée par IA

Au coeur de la recherche : la protéine Prok1

S'appuyant sur des travaux menés depuis une vingtaine d'années, et consolidés notamment par deux thèses de doctorat soutenues en 2024 et 2025, l'équipe spécialisée a identifié un facteur clé : la protéine PROK1.

Les recherches ont démontré que la protéine est un biomarqueur innovant : les niveaux de concentration de PROK1 varient de manière significative dans le sang maternel et le liquide amniotique chez les patientes présentant un risque d'accouchement prématuré.

Un rôle protecteur

PROK1 agit comme un "facteur de quiescence" aidant à maintenir la grossesse en limitant l'inflammation et le stress oxydatif, particulièrement en cas d'infection.

Une piste thérapeutique

Les tests expérimentaux montrent que la modulation de cette protéine permet de réduire l'incidence des accouchements prématurés et de préserver l'intégrité du placenta.

Le projet réunit les expertises de l'UGA, du CEA, du CNRS, de l'INSERM, et des CHU de Grenoble et Saint-Étienne. Il débutera officiellement en juin 2026.

"Ce soutien déterminant de la FRM et de nos partenaires nous permet de faire progresser une thématique d'actualité internationale pour offrir de meilleures perspectives de santé aux nouveau-nés." — L'équipe MAB2.

Tutelles UMR : CEA, Inserm, UGA

Collaborations : UGA, CHU Grenoble, CHU Saint Etienne, CNRS, Université de Caen, CEA-Saclay.

Financements : ce projet bénéficie d'un financement prestigieux de la Fondation pour la Recherche Médicale (FRM) à hauteur de 500 000 euros.

Ce soutien est complété par une aide de 60 000 euros apportée par le Pôle Universitaire d'Innovation (PUI) de l'Université Grenoble Alpes (UGA).



REFERENCE

Tiphaine Raia-Barjat, Céline Chauleur, Constance Collet, Florence Rancon, Pascale Hoffmann, Morgane Desseux, Nicolas Lemaitre, Mohamed Benharouga, Antoine Giraud & Nadia Alfaidy.

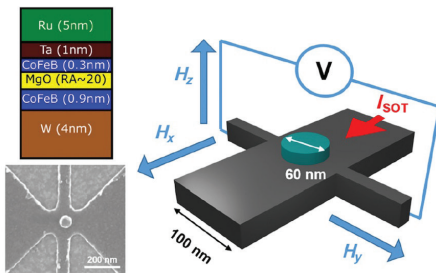
EG-VEGF maternal levels predict spontaneous preterm birth in the second and third trimesters in pregnant women with risk factors for placenta-mediated complications

Scientific Reports 2023

Un excès de courant efface la mémoire

Gilles Gaudin

Laboratoire Spintronique et Technologie des Composants



Des études sur les mémoires magnétiques à couple de spin-orbite (SOT-MRAM) ont montré qu'un courant d'écriture trop élevé peut, paradoxalement, empêcher la commutation en ramenant le point mémoire à son état initial (back-switching). Un remède proposé consiste à mettre fin graduellement et non pas abruptement à l'impulsion électrique.

La mémoire magnétique Spin-Orbit Torque (SOT-MRAM) est la seule technologie de mémoire non volatile assez rapide pour être utilisée au plus près de l'unité de calcul en remplacement de mémoires de type SRAM, de façon à augmenter les performances des circuits électroniques tout en diminuant fortement leur consommation énergétique. Cependant, dans le cas de SOT-MRAM, où l'aimantation est dite perpendiculaire, il a été montré que la probabilité d'écriture peut s'effondrer voire même osciller à fort courant.

Une équipe de **SPINTEC**, en collaboration avec la société Antaios issue du laboratoire, a quantifié ce phénomène nuisible dans des SOT-MRAM à base de couches de β W/CoFeB/MgO. En mesurant le taux d'erreur en écriture WER (Write Error Rate), elle a prouvé que ce phénomène n'était pas aléatoire mais au contraire déterministique.

Les chercheurs ont réalisé des simulations numériques dites macrospin (aimantation uniforme), basées sur des paramètres expérimentaux, qui reproduisent les cartes de WER et permettent d'expliquer le mécanisme. En injectant une impulsion de courant de forte amplitude, l'aimantation de la SOT-MRAM s'incline dans le plan, à 90° par rapport à sa direction initiale suivant l'axe -z (correspondant au bit 0). Or, cette position dynamique est instable, et à la fin de l'impulsion, durant la relaxation, les fluctuations thermiques peuvent faire revenir l'aimantation dans la direction initiale -z, faisant échouer l'écriture en laissant le bit à 0, au lieu de l'orienter dans la direction +z pour écrire le bit à 1.

La solution simple, sans avoir besoin de recourir à des matériaux aux effets physiques exotiques, est de modifier la forme de l'impulsion de courant. En prolongeant la durée de sa décroissance, le courant continue à agir sur l'aimantation au cours de la relaxation,

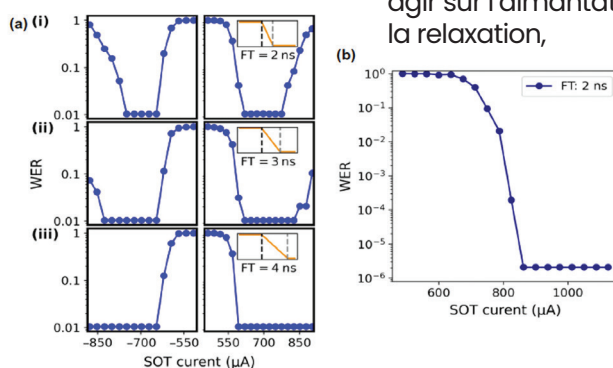
lui permettant de s'écarter de sa position d'équilibre instable de façon contrôlée. Ainsi, pour des impulsions d'une durée de 10ns, il suffit de passer de 2ns à 4ns de descente pour éviter l'effet de back-switching.

Cette solution a été démontrée sur une cellule mémoire individuelle SOT-MRAM pour laquelle aucune erreur d'écriture n'a été détectée après des centaines de milliers de tests d'écriture cumulés ($WER < 2.10^{-6}$).

Au-delà de ces résultats, ces simulations ouvrent la voie à des outils de design de circuits mémoire intégrant le back switching. Les prochains objectifs à atteindre pour le développement industriel de cette technologie sont l'obtention d'une écriture au moyen seulement d'un courant ainsi que la réduction de ce courant

Financements : EU Horizon 2020 Marie Skłodowska Curie ITN SPEAR project (Grant 955671) ; Région Auvergne Rhône Alpes (Pack Ambition Recherche, 19 009938 01 MAPS) and the French RENATECH network implemented at the Upstream Technological Platform in Grenoble (PTA, ANR 22 PEEL 0015)

Collaboration : Société Antaios



(a) Augmentation de la fenêtre d'écriture d'un point mémoire simplifié (WER minimal), en fonction de la durée de décroissance de l'impulsion électrique.
(b) Validation de cette solution sur une cellule mémoire complète et fonctionnelle.

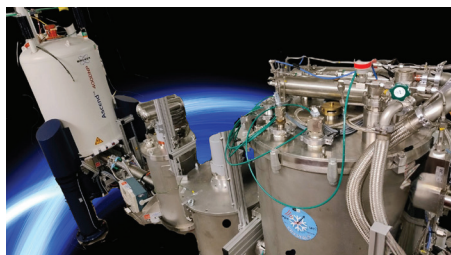
REFERENCE

Ray K, Vigier, J, Usé P, Martin S, Lefoulon N, Bouard C, Drouard M, and Gaudin G. Intrinsic back-switching phenomenon in spin-orbit torque MRAM devices *Physical Review Applied* 2025

Combattre le côté obscur de l'hypersensibilité en RMN

Sabine Hediger et Gaël De Paëpe

Laboratoire Modélisation et Exploration des Matériaux

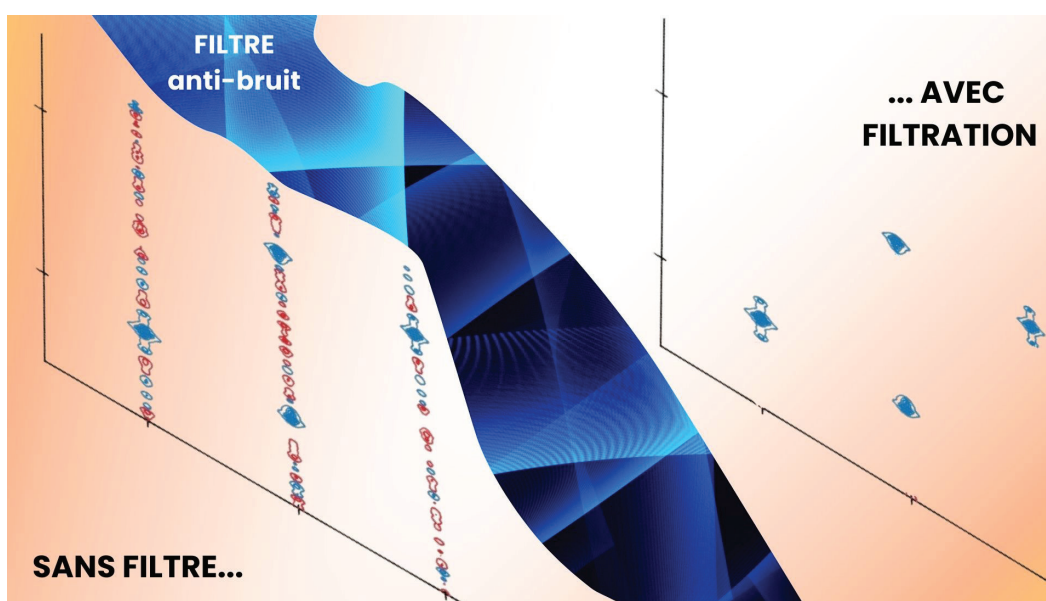


Les chercheurs du **CEA-Irig/MEM** ont mis au point une méthode pour exploiter pleinement le gain en sensibilité de la spectroscopie RMN combinée avec l'hyperpolarisation à ultra-basse température : en éliminant les artefacts de bruit engendrés par cette extrême sensibilité.

Pour exacerber la sensibilité de la spectroscopie RMN (**Résonance Magnétique Nucléaire***), une équipe du Laboratoire **MEM** au CEA-Irig a développé une technique d'**hyperpolarisation***, la **polarisation dynamique nucléaire*** (DNP), à ultra-basse température (20 K). Cependant, la sensibilité extrême ainsi obtenue sur cette instrumentation quasi-unique au monde a révélé un côté obscur : les fluctuations, d'un scan à l'autre, des signaux détectés deviennent supérieures au bruit thermique, et engendrent des artefacts qui rendent certaines expériences multi-dimensionnelles en partie inexploitable.

La RMN du solide avec hyperpolarisation (DNP) présente l'avantage de permettre l'analyse structurale de composés organiques via la détection des noyaux $^{13}\text{C}/^{15}\text{N}$ sans recourir à un enrichissement isotopique. Par exemple, cette technique permet d'observer des **cohérences « double quanta »*** entre deux atomes de ^{13}C (dont l'abondance n'est que de 1%) même en présence de **cohérences « simple quanta »*** environ 10^4 fois plus intenses. Ces expériences sont toutefois souvent affectées par des artefacts générés par les fluctuations des signaux « simple quanta ».

Dans cette étude, les auteurs ont réussi le tour de force d'éliminer la principale source des artefacts, i.e. les signaux intenses provenant des ^{13}C isolés, tout en préservant les corrélations à deux spins $^{13}\text{C}-^{13}\text{C}$ qui renseignent sur les proximités spatiales entre atomes de carbone, évitant ainsi l'apparition du bruit parasite.



A gauche, le spectre RMN-DNP obtenu sans filtre. **A droite**, le même spectre avec la méthodologie reposant sur l'utilisation combinée de deux séquences d'impulsion : un filtre zz qui élimine spécifiquement les cohérences indésirables (signaux parasites) avant la détection ; et un filtre z qui supprime les résidus de bruit persistant, garantissant un spectre final exempt d'artefacts. © CEA

« Nous présentons ici une méthode, basée sur l'utilisation de pulses RF, permettant de supprimer le bruit t_1 dans les spectres de corrélation ^{13}C - ^{13}C . Ce filtre, appelé filtre z_2 , améliore considérablement la qualité des spectres obtenus sur des spectromètres DNP commerciaux fonctionnant à une température de 100 K, ainsi que sur notre prototype ainsi que sur notre prototype « fait maison » qui nous permet d'atteindre 20 K. Cette méthodologie testée sur des échantillons modèles comme l'ampicilline (un antibiotique), présente des spectres plus clairs et plus sensibles avec une amélioration du rapport signal-sur-bruit jusqu'à un facteur 5, permettant de détecter des interactions longues distances jusque-là invisibles » précise Sabine Hediger, un des co-auteurs.

Grâce à cette nouvelle méthodologie, la sensibilité inédite de cette instrumentation quasi-unique au monde va pouvoir être mise à profit pour l'étude de systèmes complexes pour lesquels il est difficile voire impossible d'obtenir une information à

l'échelle atomique. Cela pourrait donc concerner par exemple l'étude structurale de principes actifs amorphes dans des formulations de médicaments, ou encore l'interaction de molécules à surface de nanomatériaux innovants.

Tutelles UMR : Univ. Grenoble Alpes, CEA, CNRS

Financements : EENS-Lyon, ANR (ANR-17-EURE-0003 through the labEx Arcane, ANR-15-IDEX-02 through the CDP Glyco@Alps2, and ANR-22-CE07-0046-03), FEDER

***La Résonance Magnétique Nucléaire (RMN)** est une technique d'analyse utilisée pour étudier la structure et la dynamique des molécules. Elle repose sur la détection des signaux émis par les noyaux atomiques soumis à un champ magnétique intense.

***L'hyperpolarisation** est une technique qui augmente la sensibilité de la RMN en alignant d'avance les noyaux atomiques dans une direction particulière, ce qui amplifie le signal détecté.

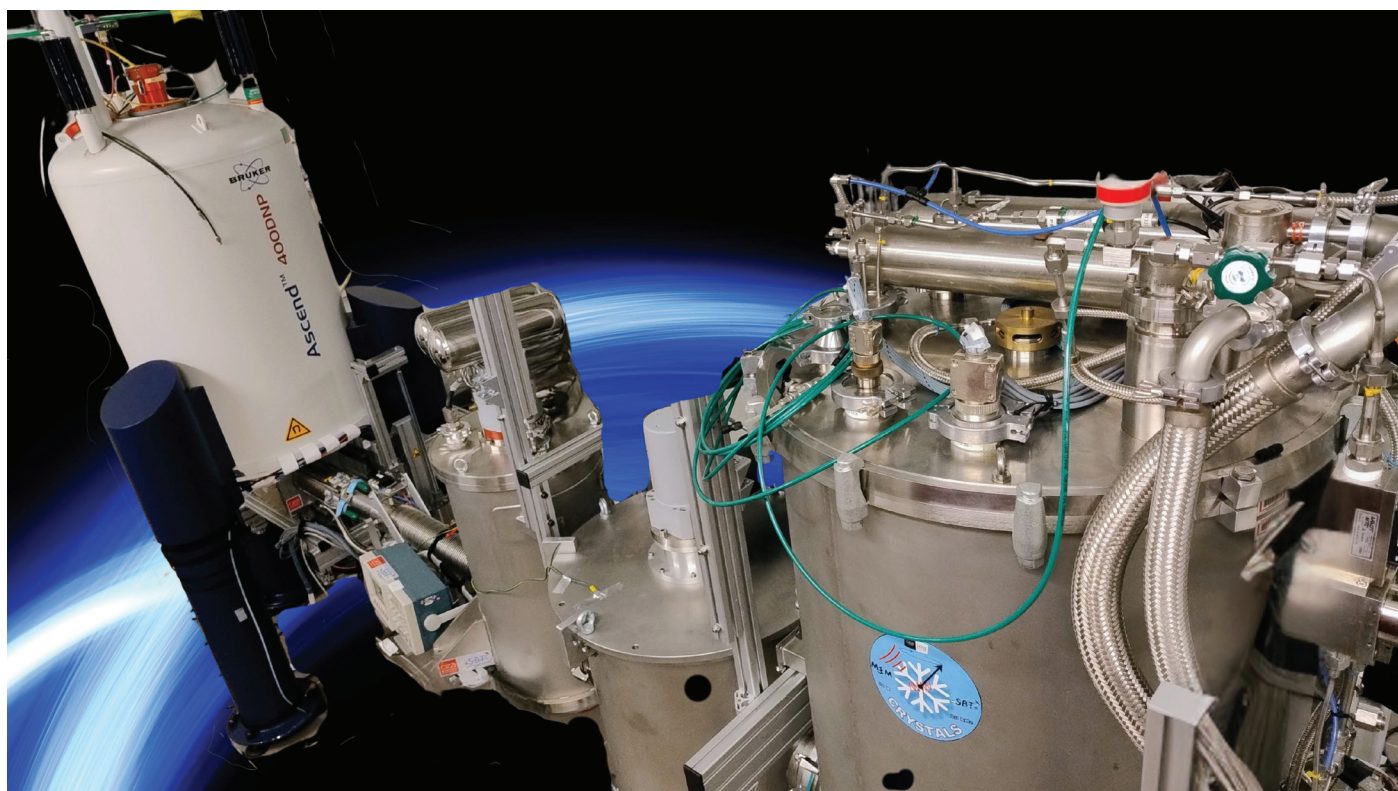
***La Polarisation Dynamique Nucléaire (DNP)** est une méthode d'hyperpolarisation qui utilise des électrons non appariés (radicaux libres) pour transférer leur polarisation aux noyaux atomiques, augmentant ainsi la sensibilité de la RMN. La particularité ici, est qu'elle est effectuée à ultra-basse température (20 K).

***Cohérences « double quanta » :** les signaux détectés entre deux noyaux atomiques (par exemple, deux atomes de carbone ^{13}C) fournissent des informations sur les interactions entre ces noyaux.

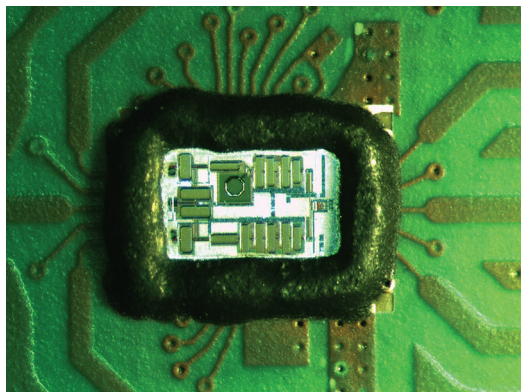
***Cohérences « simple quanta » :** Signaux détectés sur un seul noyau atomique, généralement plus intenses mais moins informatifs sur les interactions entre noyaux.

REFERENCE

Reynard-Feytis Q, Paul S, Hediger S and De Paëpe G. Artifact-free ultralow-temperature DNP-enhanced NMR of molecular assemblies at natural isotopic abundance *Science Advances* 2025



Le montage expérimental de la polarisation dynamique nucléaire (DNP) et son module à très basse température (20K)
© CEA



Validation du premier spectromètre RPE ultra-rapide alimenté par batterie à l'échelle d'une puce.

Un article présenté à l'ISSCC, conjointement porté par le CEA-Leti et le **CEA-Irig/SyMMES** dévoile un nouveau circuit intégré de 22 nm offrant une vitesse de balayage record, une large couverture spectrale et une sensibilité élevée, permettant ainsi d'intégrer la résonance paramagnétique électronique dans des systèmes portables.

[en savoir +](#)

Irina Gutsche, directrice de recherche au CNRS et responsable de groupe au **CEA-Irig/IBS** a obtenu le Prix Jacques Piraud de la Fondation de la Recherche Médicale. Ce prix, d'un montant de 15 000 € provient d'une donation de Marcel Piraud et est dédié à son fils, Jacques. Il est destiné à financer des recherches sur les maladies infectieuses.

[en savoir +](#)



Le prix JCJC 2026 a été attribué à **Sarah Hostachy** menant ses recherches au sein du laboratoire **SyMMES** (UMR 5819). Ce prix, attribué par la division transversale de Chémobiologie de la Société Chimique de France (SCF), vise à récompenser un jeune chercheur ou une jeune chercheuse ayant démarré une carrière dont les thématiques de recherche s'inscrivent dans l'un des domaines de la chémobiologie.

[en savoir +](#)

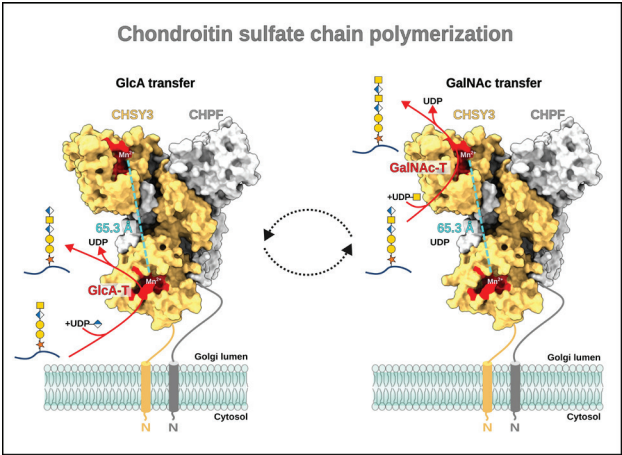
François Parcy, Directeur de recherche au **CEA-Irig/LPCV** est élu à l'Académie des sciences, section biologie intégrative.

[en savoir +](#)



Rebekka Wild, chargée de recherche CNRS au **CEA-Irig/IBS** a reçu le Prix Paoletti 2025 pour ses travaux visant à comprendre les glycosaminoglycanes au niveau moléculaire. Le prix Claude Paoletti récompense de jeunes chercheurs s'étant distingués dès leur doctorat ou leur post-doctorat pour leurs travaux portant sur les sciences de la vie.

[en savoir +](#)



comprendre la synthèse du sulfate de chondroïtine par les cellules humaines

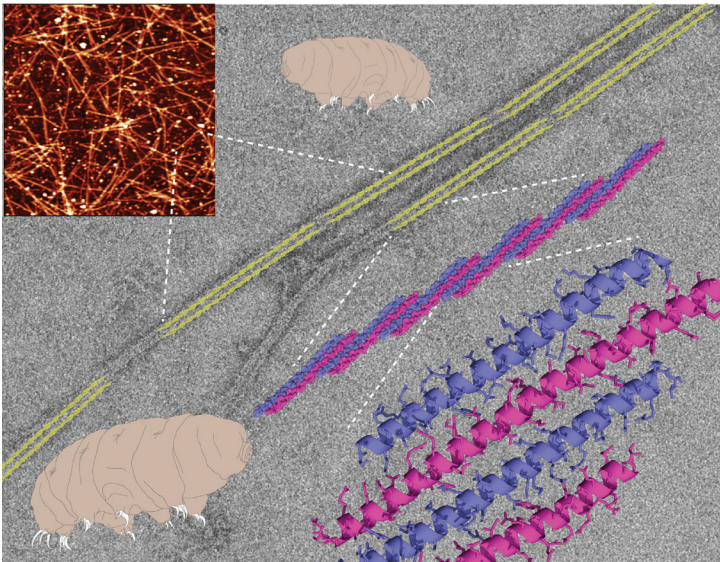
Le sulfate de chondroïtine (SC) est un long polysaccharide hautement sulfaté présent à la surface cellulaire et dans la matrice extracellulaire. Il joue un rôle important dans de nombreux processus biologiques, notamment la signalisation cellulaire et la morphogenèse.

[IBS](#)

La structure fibrillaire de la protéine CAHS-8 des tardigrades : la clé de leur résistance au stress

Les tardigrades sont des animaux aquatiques microscopiques qui présentent une résistance remarquable au stress environnemental, par exemple aux radiations, températures cryogéniques ou la dessiccation.

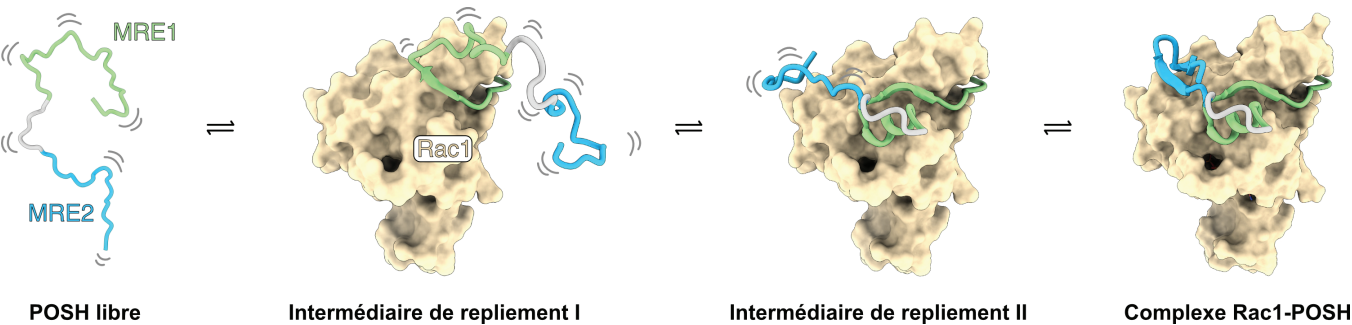
[IBS](#)



De la flexibilité à la structure : repliement progressif d'une protéine au cœur de la communication cellulaire

Les protéines intrinsèquement désordonnées (IDPs) jouent un rôle central dans la signalisation et la régulation cellulaires en médiant des interactions protéine-protéine dynamiques et dépendantes du contexte.

[IBS](#)





Photonique Electronique
et Ingénierie Quantiques
CEA-UGA
www.Pheliqs.fr

Spintronique
et Technologie
des Composants
CEA-CNRS-UGA
www.Spintec.fr

Institut de Biologie
Structurale
CEA-CNRS-UGA
www.IBS.fr

Chimie et Biologie
des Métaux
CEA-CNRS-UGA
www.CBM-lab.fr

Physiologie Cellulaire
et Végétale
CEA-CNRS-UGA-INRAE
www.LPCV.fr

Biologie et Biotechnologie
pour la Santé
CEA-Inserm-UGA
www.Biosante-lab.fr

Systèmes Moléculaires
et nanoMatériaux
pour l'Énergie et la Santé
CEA-CNRS-UGA
www.Symmes.fr

Modélisation et Exploration
des Matériaux
CEA-UGA
www.MEM-lab.fr

Biosciences et Bioingénierie
pour la Santé
CEA-Inserm-UGA
www.BGE-lab.fr

Département des Systèmes
Basses Températures
CEA-UGA
www.d-SBT.fr



Institut de Recherche
Interdisciplinaire de
Grenoble

CEA
17 Avenue des Martyrs
38054 Grenoble Cedex 9

Directrice de la publication
Pascale Bayle Guillemaud
Editeur et format électronique
Alain Farchi

Comité de rédaction : Claude Alban, Nadia
Alfaidy-Benharouga, Anthony Attard, Thom-
as Burger, Aurélien Deniaud, Didier Gaspar-
utto, Gilles Gaudin, Sabine Hediger, Hakima
Mendil-Jakani, Martin Weik, Michaël Zhitomirski,
Alain Farchi, Emmanuelle Neumann, Mathilde
Costes-Majorel



Suivez-nous sur LinkedIn

