Lettre scientifique

HIVER 2025

© Benjamin Large (sceyence illustrations)

Sommaire

Faits Marquants

L'enzyme USP36 : une déubiquitinase avec deux modes d'action
Emmanuel Taillebourg
Laboratoire Biosciences et Bioingénierie pour la santé p. 2

Vieillissement des plastiques : qu'en est-il de leur dégradation ?
Thierry Douki
Laboratoire Systèmes Moléculaires et nanoMatériaux pour l'Énergie et la Santé p. 3

Des bactéries qui résistent à l'acide hypochloreux
Vincent Nivière
Laboratoire Chimie et Biologie des Métaux p. 5

Premières mesures d'impact d'un solide cryogénique d'hydrogène à 500 m/s
Jordan Berton
Département des Systèmes Basses Températures p. 6

Une preuve de concept pour l'édition épigénétique chez les plantes
Christel Carles
Laboratoire Physiologie Cellulaire & Végétale p. 8

Opération optimale d'un qubit de spin
Vivien Schmitt
Laboratoire PHotonique ELectronique et Ingénierie QuantiqueS
& *Laboratoire Modélisation et Exploration des Matériaux* p. 9

Comment une bactérie industrielle contenant du tungstène transforme les fumées nocives d'usine en biocarburant
Tristan WAGNER
Institut de Biologie Structurale p. 10

Une structure moléculaire dynamique pour des cultures durables capables de fixer leur propre azote
Yvain Nicolet
Institut de Biologie Structurale p. 12

Mesurer les neurones autrement grâce à l'automatisation
Elisa Miglioni
Laboratoire Biologie et Biotechnologies pour la Santé p. 14

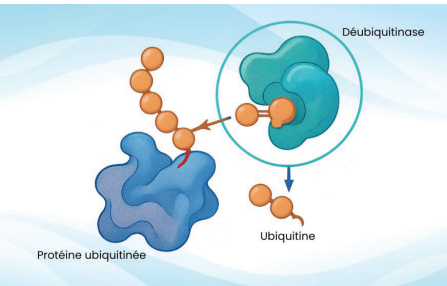
Le son à sens unique
Olivier Klein
Laboratoire Spintronique et Technologie des Composants p. 15

Communiqués - Prix - Media

Autres résultats scientifiques des laboratoires

L'enzyme USP36 : une déubiquitinase avec deux modes d'action

Emmanuel Taillebourg
Laboratoire Biosciences et Bioingénierie pour la santé



Les chercheurs du **CEA-Irig/BGE** ont découvert chez la drosophile que l'activité enzymatique de la déubiquitinase USP36 est indispensable à la spermatogenèse mais pas à la croissance cellulaire. Ce double mode d'action est inédit chez cette famille d'enzyme.

Les déubiquitinases (DUBs) sont des enzymes qui retirent **l'ubiquitine*** des protéines ubiquitinées et participent ainsi à la régulation de très nombreux processus cellulaires. Parmi elles, USP36 joue un rôle central en stabilisant plusieurs protéines comme l'oncogène MYC, un régulateur majeur de la croissance et de la prolifération cellulaire dont la dérégulation est à la base de nombreux cancers. En utilisant la mouche Drosophile comme modèle génétique, l'équipe **CEA-Irig/BGE/Gen&-Chem** a exploré les mécanismes d'action de cette enzyme, afin de distinguer les fonctions dépendantes ou indépendantes de son activité catalytique.

Par édition du génome *via* la technique innovante **CRISPR/Cas9*** les chercheurs ont produit des mouches exprimant une version mutée d'USP36 dépourvue d'activité enzymatique. Alors que des mutants n'exprimant plus du tout la protéine USP36 meurent précocement au cours du développement avec de forts défauts de croissance (*cf.* milieu de **figure**) les mutants catalytiques d'USP36 survivent et se développent normalement (*cf.* à droite de la **figure**). Cependant, les mâles porteurs de cette mutation sont stériles et présentent des défauts de spermatogenèse. Ce contraste révèle que la présence de la protéine USP36 est nécessaire à la croissance mais que son activité catalytique ne l'est pas. Par contre, l'activité enzymatique de cette protéine est cruciale à la formation des spermatozoïdes.

Cette étude montre que la déubiquitinase USP36 présente un double mode d'action inédit car elle agit soit comme une protéine structurale soit comme une enzyme active, suivant le contexte. Cela ouvre de nouvelles perspectives sur les rôles non enzymatiques des déubiquitinases dans le développement et la physiologie cellulaire.

A gauche : drosophile normale.
Au milieu : mutant ne produisant plus la protéine USP36.
A droite : mutant catalytique de USP36. © CEA

L'ubiquitine* est une petite protéine hautement conservée qui se lie de façon covalente à d'autres protéines pour moduler leur stabilité, leur localisation ou leur activité.

CRISPR/Cas9* est une technique d'édition du génome qui utilise une enzyme (Cas9) guidée par un ARN pour couper l'ADN à un site précis, permettant d'inactiver un gène ou d'introduire une modification spécifique.

Financements
- IDEX Université Grenoble Alpes
- GRAL PhD Program

REFERENCE
Coirry C, Manessier J, Clot C, Mortier M, Fauvarque M-O, and Taillebourg E.
The deubiquitinase USP36 functions through catalytic-dependent and catalytic-independent mechanisms in Drosophila
Genetics 2025

Vieillissement des plastiques : qu'en est-il de leur dégradation ?

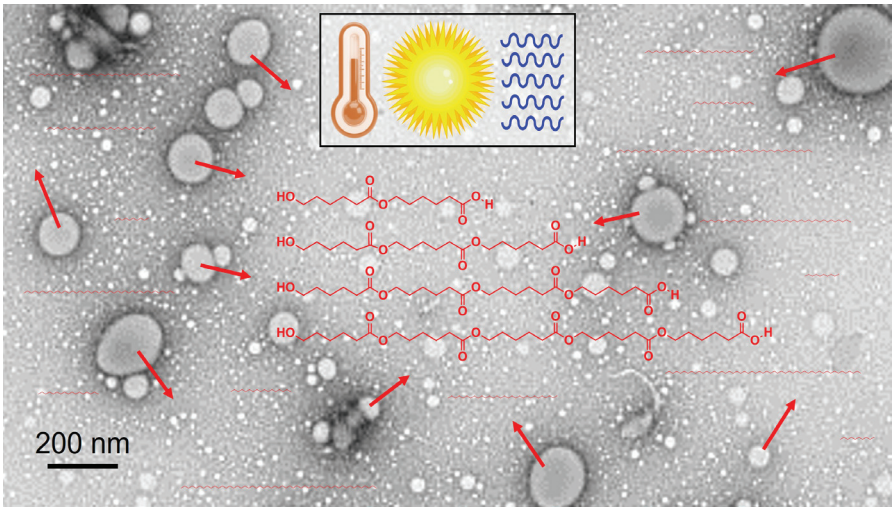
Thierry Douki
Laboratoire Systèmes Moléculaires et nanoMatériaux pour l'Énergie et la Santé

Pour pallier l'accumulation de micro- et nanoplastiques dans l'environnement, certains secteurs d'activités se tournent vers l'utilisation de plastiques biodégradables capables de se décomposer dans l'environnement. Mais que produit cette dégradation et quelle est la toxicité associée ? C'est à cette question qu'une équipe de chercheurs du **CEA-Irig/SyMMES** a tenté de répondre.

Les plastiques sont partout : emballage, industrie textile, jouets, médecine, … et leur consommation ne cesse de croître. Plus de 80% de ces plastiques consistent en des polymères très stables, issus principalement d'hydrocarbures fossiles, qui s'accumulent dans les sols et les mers. Ils y relarguent des micro- et des nanoplastiques, soulevant ainsi des préoccupations en termes de toxicité humaine et environnementale.

Pour pallier cette accumulation, certains secteurs d'activités se tournent vers l'utilisation de plastiques biodégradables capables de se décomposer dans l'environnement. Ces propriétés sont rendues possibles par leur structure chimique polyester différente de celles des plastiques classiques possédant uniquement des liaisons C-C stables.

En 2024, les plastiques biodégradables représentaient moins de 1% de la production totale de plastiques. Afin d'encourager cette stratégie comme alternative aux plastiques qui s'accumulent dans l'environnement, il y a nécessité de s'assurer de la non-toxicité des produits dégradés. Pour cela, le premier objectif est d'identifier et caractériser les produits de dégradation, puis de les quantifier afin d'évaluer les risques associés.



Sous l'influence combinée de la température, de la lumière solaire et de l'eau, les particules de plastiques biodégradables libèrent de petites molécules solubles, les oligomères. © CEA/SyMMES/CIBEST/T. Douki

L'équipe du **CEA-Irig/SyMMES** s'est intéressée à plusieurs plastiques biodégradables « *purs* » sous forme de billes sub-micrométriques (< 1mm) vieillies artificiellement. Pour cela, des suspensions de particules ont été placées à 40 °C sous une exposition lumineuse mimant le soleil équatorial pendant une durée de 96 heures. L'analyse par spectrométrie de masse couplée à de la chromatographie liquide haute performance (HPLC) a permis de séparer et caractériser de manière très précise les produits de dégradation contenus dans la phase liquide de la suspension, et a montré une hydrolyse des particules en oligomères.

Parmi les plastiques précédemment étudiés, les chercheurs du SyMMES ont poussé leur investigation pour le polycaprolactone (PCL) un plastique biodégradable utilisé dans certains emballages et dans de nombreuses applications médicales. Grâce à la synthèse chimique d'oligomères de PCL, ils ont pu optimiser les méthodes d'analyse et collecter sous plusieurs conditions des données quantitatives des différents oligomères relâchés lors de l'hydrolyse de particules de PCL. Ils ont ainsi pu montrer que l'hydrolyse de PCL était indépendante de la taille des particules et que la distribution des oligomères présents dansles suspensions après vieillissement dépendait de la température (plus rapide à 60 °C qu'à 40 °C) et de la composition du milieu (rendement trois fois plus important en eau de mer qu'en eau pure).

Les recherches sur les polymères biodégradables menées par l'équipe du SyMMES ont donc permis d'avancer sur l'identification des composés générés lors de leur dégradation. L'utilisation d'outils de chimie analytique sensibles et spécifiques, habituellement utilisés pour le dosage de biomarqueurs, a pu montrer la prépondérance des réactions d'hydrolyse lors du vieillissent de particules. Ces données complèteront les études de toxicologie *in vitro* en cours. Elles devraient confirmer l'innocuité des plastiques biodégradables et valider leur utilisation comme alternative aux matériaux conventionnels à l'origine de la pollution plastique actuelle.

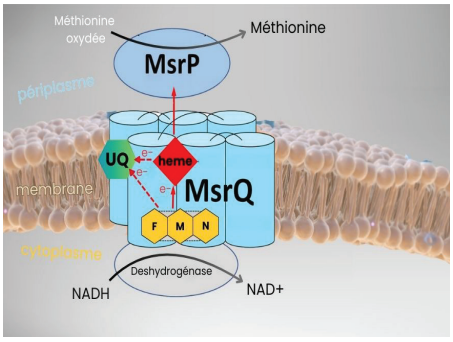
Financements

- Projet Européen PlasticHeal,
- Projet ANR PLASTOX,
- Projet ANSES EXAMINA,
- Agence de la Transition Ecologique

REFERENCE
Maëva Boulée, Marie Carrière, Thierry Douki
Quantitative HPLC–mass spectrometry analysis shows the drastic impact of the composition of aqueous and biochemical media on the release of soluble hydrolysis products from submicron polycaprolactone
Polymer 2025

Des bactéries qui résistent à l'acide hypochloreux

Vincent Nivière
Laboratoire Chimie et Biologie des Métaux



Dans le contexte de la lutte contre l'antibiorésistance, un nouveau système enzymatique MsrPQ pourrait expliquer certains des mécanismes de la virulence bactérienne. Les chercheurs du **CEA-Irig/LCBM** étudient ce système afin de développer de nouveaux types d'antibiotiques

Comprendre les mécanismes à l'origine de la résistance des micro-organismes pathogènes est primordial pour développer de nouveaux types d'antibiotiques. Les chercheurs du **CEA-Irig/LCBM/BioCat** analysent plus précisément le système enzymatique MsrPQ qui pourrait permettre à ces bactéries de résister à notre système immunitaire. Il y a quelques années, des chercheurs ont découvert chez certaines bactéries pathogènes un nouveau système enzymatique Méthionine sulfoxyde réductase (MsrPQ) qui leur permettrait de résister à l'acide hypochloreux HOCl, produit par les cellules du système immunitaire inné telles que les macrophages et les neutrophiles.

L'acide hypochloreux provoque spécifiquement une oxydation des méthionines des protéines bactériennes, ce qui entraîne la perte de leur structure et de leur activité, et conduit à la mort du pathogène. Or, en réaction de défense, ces bactéries ont développé le système MsrPQ qui répare ces méthionines oxydées.

Grâce à des approches complémentaires (mutagénèse dirigée, spectroscopie de résonance paramagnétique électronique, électrochimie, chromatographie en phase liquide à haute performance couplée à la spectrométrie de masse et AlphaFold), les chercheurs du CEA-Irig/LCBM/BioCat ont pu étudier en détail le mécanisme de MsrPQ, et notamment le rôle central de son composant membranaire MsrQ, qui catalyse une réaction spécifique de transfert d'électrons de l'espace cytoplasmique vers le périplasme. De plus, ils ont identifié que MsrQ contient, outre un **hème*** deux nouveaux cofacteurs redox : une **flavine*** et une **ubiquinone*** (voir **Figure**).

Au-delà de ces aspects fondamentaux étudiés ici, la compréhension du fonctionnement de ce nouveau système permettra de mieux caractériser les mécanismes de virulence bactérienne et de développer de nouveaux types d'antibiotiques.

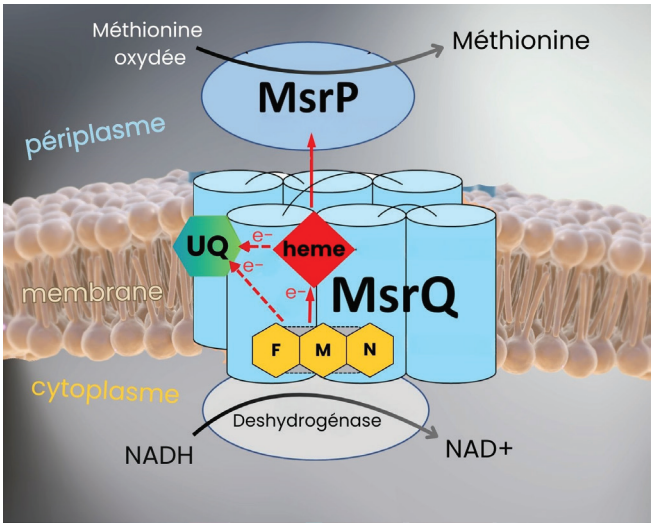


Figure : Système MsrPQ répare les méthionines périplasmiques oxydées par HOCl. La composante membranaire MsrQ, contient trois cofacteurs redox (hème type b, flavine FMN, et ubiquinone UQ) dont deux permettent d'acheminer spécifiquement les électrons du cytoplasme vers le périplasme pour la régénération des méthionines oxydées. © CEA

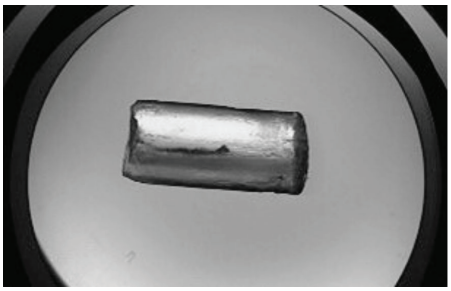
* Les **hèmes** et les **flavines** sont des cofacteurs redox biologiques qui, lorsqu'ils sont associés à des enzymes, leur permettent de catalyser des réactions impliquant des transferts d'électrons.

* **L'ubiquinone** remplit également cette fonction, mais elle est plus généralement localisée dans les membranes cellulaires.

REFERENCE
Philippe Carpentier et al.
Studies of the membrane-bound flavocytochrome MsrQ flavin mononucleotide (FMN)-binding site reveal an unexpected ubiquinone cofactor
The FEBS Journal 2025

Premières mesures d'impact d'un solide cryogénique d'hydrogène à 500 m/s

Jordan Berton
Département des Systèmes Basses Températures



Les chercheurs du **CEA-Irig/DSBT** ont conçu un banc d'essai pour caractériser l'impact de solides cryogéniques. Les essais physiques associés aux calculs numériques permettent de prédire la force d'impact et la fracturation dans des conditions d'utilisation similaires à celles prévues pour le tokamak ITER.

Le Programme Transverse de Compétences « *Dynamic Fragmentation of Ice* » (PTC DeFI) consiste à étudier la fragmentation des solides cryogéniques destinés à atténuer les disruptions du plasma dans le réacteur ITER. Dans ce cadre, une étude préalable a été menée avec des glaçons d'eau impactant une cible rigide. Les résultats de ces travaux, menés conjointement avec l'Institut de Géosciences et de l'Environnement (CNRS/IGE) et le laboratoire Sols, Solides, Structures, Risques de l'Université Grenoble Alpes (UGA/3SR) viennent d'être publiés dans International Journal of Impact Engineering [**1**].

La première étape du PTC fût d'étudier, dans les mêmes conditions expérimentales que les solides cryogéniques, un matériau mieux connu de la littérature, à savoir la glace d'eau. Des glaçons de taille similaire à ceux requit pour ITER (Ø = 28,5 mm et L = 57 mm) ont été produits à l'IGE pour être ensuite testés au laboratoire 3SR. De plus, des simulations ont été réalisées avec le code DFH-KST déjà existant pour d'autres matériau fragile comme le béton, ou la céramique.

Le procédé de fabrication des glaçons d'eau développé par l'IGE, permet la maîtrise de la taille des grains ainsi que du taux de porosité. La structure produite a été vérifiée par tomographie à rayon X. Les essais d'impact direct menés à 3SR ont utilisé la méthode des barres d'essai d'Hopkinson reposant sur la propagation des ondes élastiques dans les milieux continus. A l'aide d'un canon à gaz, les glaçons d'eau sont projetés à 30 m/s sur une barre en aluminium. L'impact produit une onde élastique de déformation dans la barre, et elle est mesurée au cours du temps à l'aide de jauges de déformation. Simultanément, la propagation des fissures dans les glaçons d'eau est capturée à l'aide d'une caméra ultra-rapide ayant une fréquence d'acquisition de 200 kHz. Le modèle DFH-KST a été implémenté au logiciel EUROPLEXUS du CEA et a permis de prédire l'évolution temporelle de la force d'impact pour les glaçons de glace d'eau en fonction de leur angle d'impact et de leur vitesse. Ces résultats expérimentaux et numériques ont été détaillés dans le journal de référence concernant les problématiques d'impact [**1**].

Ce travail a validé expérimentalement l'utilisation d'un modèle d'endommagement pour des matériaux fragiles et dans des conditions d'essais similaires à celles présentes dans ITER.

L'étape suivante du PTC-DeFI consistait à mesurer la force d'impact de solides cryogéniques constitués d'hydrogène, de néon, de deutérium ou d'un mélange de ces matériaux. Le banc d'essai du CEA-Irig/DSBT a été spécialement conçu pour produire ces solides par désublimation in-situ, pour ensuite les propulser avec un canon à gaz pour des vitesses de l'ordre de 500 m/s. Pour caractériser l'impact de ces solides cryogéniques, les chercheurs ont développé un système d'acquisition capable d'enregistrer les données de déformation jusqu'à 1 MHz et de filmer l'impact jusqu'à 1 million d'images par seconde.

Un tel système de mesure de la force d'impact de solides cryogéniques est inédit. Des campagnes expérimentales ont été menées avec les paramètres de formation et d'accélération requis pour ITER. Une étude de reproductibilité avec 18 tirs d'hydrogène solide, formés et accélérés suivant les mêmes paramètres à l'aide d'un système de contrôle commande développé par le DSBT, a permis d'obtenir des résultats prometteurs pour l'étude des impacts de solides cryogéniques. Ces premiers résultats mettent en avant des paramètres importants à maitriser autant d'un point de vue du dispositif expérimental (diamètre de la barre, système d'acquisition) que concernant les paramètres de fabrication des solides cryogéniques (température, pression et débit d'injection). D'ores et déjà, nous avons montré la capacité de filmer l'impact des glaçons d'hydrogène solide lancés à 500 m/s (**Figure 1**) et de mesurer l'évolution temporelle de leur force d'impact (**Figure 2, ci-contre**).

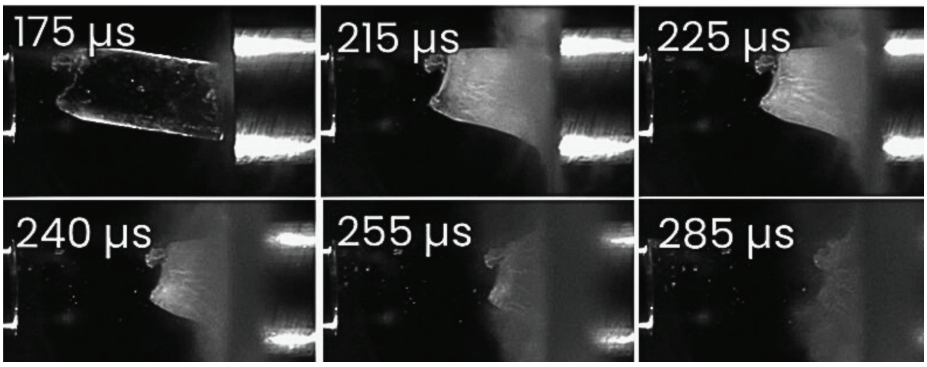


Figure 1 : Images séquentielles de l'impact d'un glaçon d'hydrogène solide à 500m/s © CEA

L'analyse des résultats est en cours et cette campagne expérimentale fera l'objet d'une nouvelle publication. Ces premiers résultats prometteurs ont permis d'obtenir une bourse européenne EUROfusion Engineering Grant pour prolonger les travaux du PTC et élargir les prédictions des modèles actuels sur des plaques inclinées, approchant ainsi les géométries réelles présentes dans les systèmes d'injection de glaçons des réacteurs de fusion par confinement magnétique comme ITER ou le futur démonstrateur EU-DEMO.

Ces travaux ont permis de développer des dispositifs instrumentaux et des modèles numériques spécifiquement dédiés aux fragmentations des solides cryogéniques injectés dans les réacteurs de fusion. De façon plus générale, une meilleure connaissance des propriétés mécaniques des solides cryogéniques permettra de prédire leur comportement lors des impacts et de glissements survenus lors de leur injection. En perspective, il est prévu d'étudier le processus de fragmentation des solides cryogéniques en fonction de l'angle d'impact et en fonction aussi des paramètres de fabrication.

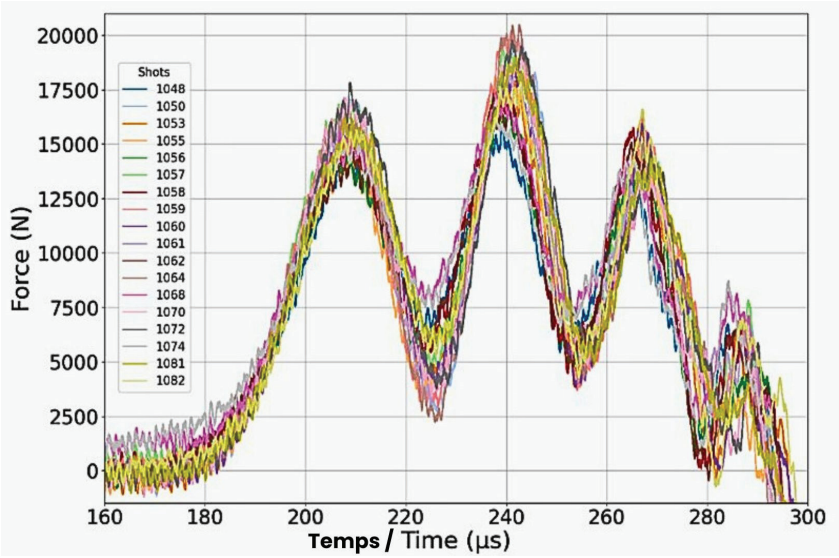


Figure 2 : Evolution de la force d'impact en fonction du temps pour une série de 18 tirs d'hydrogène solide à 500 m/s.

Collaboration

- Institut Géosciences et de l'Environnement, CNRS
- Laboratoire Sols, Solides, Structures et Risques, UGA

Financements

- PTC ID
- EEG 2024.

REFERENCE
[1] J. Berton et al.
Experimental and numerical investigation of the impact force generated by cylindrical ice water pellets
International Journal of Impact Engineering 2025

Une preuve de concept pour l'édition épigénétique chez les plantes

Christel Carles
Laboratoire Physiologie Cellulaire & Végétale

Des chercheurs du **CEA-Irig/LPCV** rapportent, pour la première fois chez les plantes, la preuve de concept d'un outil d'édition **épigénétique*** qui supprime une **marque chromatinienne*** avec des effets de l'échelle moléculaire jusqu'à l'échelle développementale.

Les approches de génétique conventionnelle, bien qu'efficaces pour caractériser des facteurs impliqués dans les modifications de l'activité des gènes, atteignent leurs limites lorsqu'il s'agit d'étudier l'impact direct de marques **épigénétiques*** sur la transcription et le développement des plantes ; ceci en raison, entre autres, de facteurs aux activités redondantes et plurivalentes. Pour tenter de contourner cette limitation, des chercheurs de l'équipe Dynamiques Chromatiniennes et Transitions Développementales (**ChromDev**) au **CEA-Irig/LPCV** ont utilisé une nouvelle approche d'édition épigénétique basée sur la **technologie dCas9*** (« *dead* » Cas9) permettant de révéler les fonctions directes et véritables de marques épigénétiques.

La marque épigénétique H3K27me3, modification chromatinienne conservée chez les eucaryotes multicellulaires, est fortement associée à la répression des gènes développementaux. L'étude démontre sa fonction exacte chez les plantes pour le recrutement ciblé, *via* dCas9, d'une activité enzymatique sur le gène développemental CUP SHAPED COTYLEDON 3 (CUC3) d'*Arabidopsis thaliana*, en utilisant un outil d'édition épigénétique. Le retrait de la marque H3K27me3 induit une transcription plus étendue de CUC3 dans les tissus de la plante, entraînant une altération de la morphologie des feuilles et la production d'inflorescences bifides.

L'édition épigénétique promet d'être une approche puissante pour disséquer les impacts fonctionnels des marques épigénétiques sur la transcription et la morphogenèse. La mise en œuvre de systèmes d'édition inductibles permettra d'en suivre les effets en temps réel.

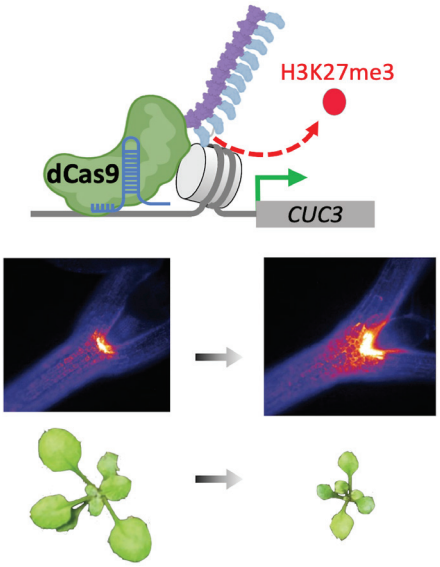


Figure : Démonstration de l'efficacité d'un outil d'édition épigénétique sur une cible spécifique : le gène frontière CUC3 d'*Arabidopsis thaliana*, pour lequel le retrait de la marque H3K27me3 entraîne l'extension de son domaine d'expression, suivie de changements développementaux chez la plante (*e.g.* la taille et la forme des feuilles de rosette, comme illustré ici).
© CEA-Irig/LPCV/C. Carles

Collaboration

- IBMP (Institut de Biologie Moléculaire des Plantes)

Financements

- ANR, Agence Nationale de la Recherche : PRC projet REWIRE,
- ANR : Labex Gral (Grenoble Alliance for Cell and Structural Biology,
- ANR : Graduate School CBH, Université Grenoble Alpes

Edition épigénétique*: modification moléculaire ciblée par l'action d'une enzyme qui altère une marque épigénétique, sans changer la séquence d'ADN. Cette édition vise à reprogrammer l'activité du gène ou de la région génomique ciblée.

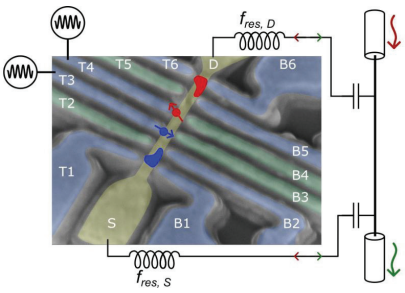
Marque épigénétique/chromatinienne* : groupement chimique fixé à l'ADN ou aux protéines histones qui y sont associées. Cette marque peut influencer l'accessibilité aux gènes et moduler leur transcription. La marque chromatinienne éditée dans cette étude est la triméthylation de la lysine en position 27 de l'histone H3 (H3K27me3) ; par nos travaux, nous observons son rôle répresseur sur la transcription.

Technologie dCas9* : variante de la technologie CRISPR-Cas9. Cette dernière utilise un court ARN (ARN guide) pour amener l'enzyme Cas9, à une séquence précise d'ADN pour y effectuer une coupure, déclenchant ainsi un mécanisme de réparation et donc une modification du gène correspondant. dCas9 (« dead » Cas9) est rendue inactive pour la coupure, mais peut toujours se fixer à un endroit précis de l'ADN grâce à l'ARN guide. Si elle est couplée à une enzyme modifiant une marque épigénétique, dCas9 l'amène sur une région d'ADN spécifique pour changer cette marque (ici, pour retirer H3K27me3).

REFERENCE
K. Fal, S. El Khoury, M. Le Masson, A. Berr and C. Carles
CRISPR/dCas9-targeted H3K27me3 demethylation at the CUC3 boundary gene triggers ectopic transcription and impacts plant development
iScience 2025

Opération optimale d'un qubit de spin

Vivien Schmitt
Laboratoire PHotonique ELectronique et Ingénierie QuantiqueS
& *Laboratoire Modélisation et Exploration des Matériaux*



En étudiant les propriétés d'un qubit de spin de trou dans un dispositif en silicium fabriqué par le CEA-Leti, deux équipes des Unités Mixtes de Recherche **Pheliqs** et **MEM** du CEA-Irig ont démontré l'existence de conditions de fonctionnements optimales pour lesquelles la vitesse de contrôle et le temps de cohérence - deux figures de mérite généralement antagonistes - sont simultanément maximisés.

Les qubits de trous en silicium ou en germanium figurent parmi les candidats prometteurs pour un futur processeur quantique à grande échelle. Ils offrent des performances élevées, tout en étant compatibles avec les technologies de la microélectronique. Leur fort couplage spin-orbite permet un contrôle électrique rapide, au prix d'une sensibilité accrue au bruit de charge qui dégrade leur cohérence.

Nous avons démontré que l'alignement du champ magnétique externe joue un rôle crucial dans les performances des qubits de spin de trou. Notre expérience a montré que la susceptibilité du qubit au bruit de charge de son environnement varie significativement en fonction de l'orientation du champ et que, notamment, il existe des régions où le qubit est essentiellement découplé du bruit. L'efficacité du contrôle, quant à elle, varie aussi avec la direction du champ, la bonne nouvelle étant qu'elle atteint son maximum là où le qubit est moins sensible au bruit et donc plus cohérent (*cf.* **Figure**). Ces points de fonctionnement ne sont pas fixes : ils peuvent être ajustés en variant le voltage des grilles pour contrôler le confinement du trou. Nous avons démontré qu'un tel réglage électrique permet d'aligner plusieurs qubits sur une même orientation optimale du champ magnétique et que, par conséquent, les fidélités d'opération de plusieurs qubits peuvent être simultanément maximisées. Ces résultats sont étayés par des modèles théoriques qui démontrent l'existence générale de tels points de fonctionnement où contrôle et résilience au bruit sont simultanément optimisés.

Cette preuve de concept ouvre la voie à des architectures multi-qubits de trou plus robustes et plus faciles à mettre à l'échelle. En principe, sa valeur conceptuelle pourrait s'étendre à d'autres matériaux confinant des trous telles que les hétérostructures de Ge/SiGe.

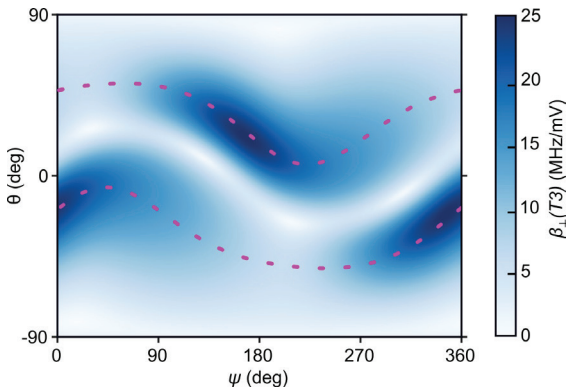
Tutelles Unité Mixte de Recherche

- Pheliqs : CEA, UGA, et Grenoble INP-UGA
- MEM : CEA et UGA

Financements

- PEPR Presquile
- projet européen QuCube,
- projet européen QLSI/QLSI2
- LaBEx LANEF

REFERENCE
Bassi M. *et al.*
Optimal operation of hole spin spin Qubits
Nature Physics 2025



Régions optimales d'opération. La carte montre l'efficacité de contrôle électrique en fonction des angles polaire et azimutale du champ magnétique. Les régions d'efficacité maximale (bleu foncé) se trouvent sur les lignes où le qubit est insensible au bruit de charge (lignes pointillées) ce qui démontre expérimentalement l'existence de conditions d'opération optimales.

Comment une bactérie industrielle contenant du tungstène transforme les fumées nocives d'usine en biocarburant

Tristan WAGNER
Institut de Biologie Structurale

Des chercheurs de l'Institut de Biologie Structurale, de l'Institut Max Planck de microbiologie marine et de l'Institut Max Planck de biologie cellulaire et de génétique moléculaire ont élucidé une étape clé de la conversion du monoxyde de carbone en bioéthanol effectuée par la bactérie *Clostridium autoethanogenum*.

Cette découverte, publiée dans Nature Chemical Biology met en lumière le rôle déterminant d'une enzyme contenant du tungstène et ouvre de nouvelles perspectives pour la production durable de biocarburants à partir de gaz industriels.

Transformer un déchet toxique en ressource énergétique : une énigme biochimique résolue

Clostridium autoethanogenum est un microbe étonnant capable de se nourrir de monoxyde de carbone (CO) pur, un gaz toxique pour la plupart des organismes, incluant les êtres humains. Le microbe convertit majoritairement le gaz en éthanol, ce qui en fait un organisme prometteur pour la synthèse de biocarburants. Cependant, malgré son intérêt pour la biotechnologie, le mécanisme exact par lequel la bactérie transforme le CO en alcool demeurait jusqu'à présent mal compris. Notamment, une des étapes du processus, la conversion de l'acétate en acétaldéhyde, était remise en question au sein de la communauté scientifique.

Dans cette étude, les chercheurs ont montré qu'une enzyme, appelée aldéhyde:ferrédoxine oxydoréductase (AFOR), effectue cette étape clé du processus de production d'éthanol. L'AFOR est une enzyme contenant du tungstène, l'atome le plus lourd utilisé dans des processus biologiques naturelles connues. Ils ont réussi à isoler cette enzyme et à en déterminer la structure atomique par cristallographie aux rayons X, ce qui leur a permis dedécrire la configuration précise du centre catalytique du tungstène et de son environnement moléculaire.

Après de longues expérimentations, les chercheurs ont également trouvé le moyen de réactiver l'enzyme, initialement inactive après son isolation hors de la bactérie. Ils ont alors pu démontrer sa capacité à réduire une large gamme de substrats, ouvrant la voie à la production d'autres alcools que l'éthanol.

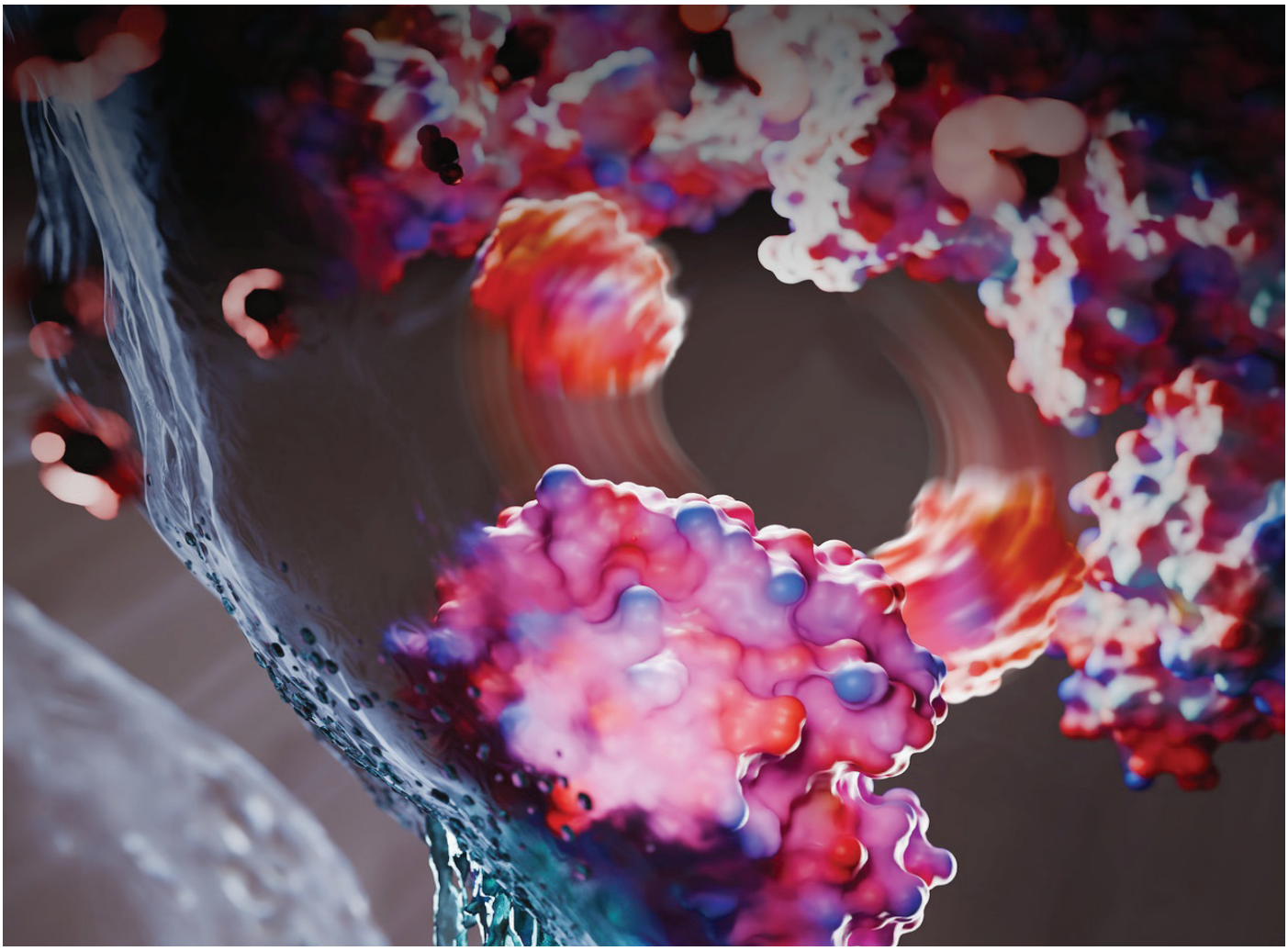
Afin de confirmer que la réaction remise en cause pouvait effectivement exister dans l'organisme, les chercheurs ont reconstitué in vitro une voie enzymatique artificielle. En recréant le couplage enzymatique qui existe en cellule, ils ont démontré que la conversion de l'acétate en éthanol est biologiquement réalisable.

Une réaction défavorable rendue possible grâce à la coopération enzymatique

Ces résultats apportent un maillon manquant dans la compréhension du métabolisme de *C. autoethanogenum* et ouvrent la voie à de nouvelles stratégies d'ingénierie métabolique pour la production de biocarburants et de molécules d'intérêt à partir de gaz industriels polluants.

Cette avancée représente un pas supplémentaire vers une économie circulaire du carbone, où les déchets gazeux pourraient devenir des ressources énergétiques renouvelables.

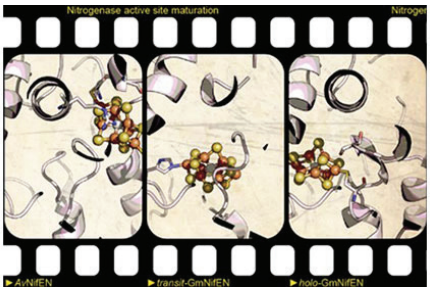
REFERENCE
Olivier N. Lemaire, Mélissa Belhamri, Anna Shevchenko, Tristan Wagner.
Carbon monoxide-driven bioethanol production operates via a tungsten-dependent catalyst.
Nature Chemical Biology 2025



Proposition de couverture pour le journal *Nature Chemical Biology*.
Les molecules de CO_2 et CO diffusent dans les cellules de *C. autoethanogenum* jusqu'au complexe CODH/ACS, où leur conversion via le cycle de la ferrédoxine alimente l'enzyme AFOR, essentielle à la production d'éthanol et à la formation de biocarburants. © Benjamin Large (sceyence illustrations)

Une structure moléculaire dynamique pour des cultures durables capables de fixer leur propre azote

Yvain Nicolet
Institut de Biologie Structurale



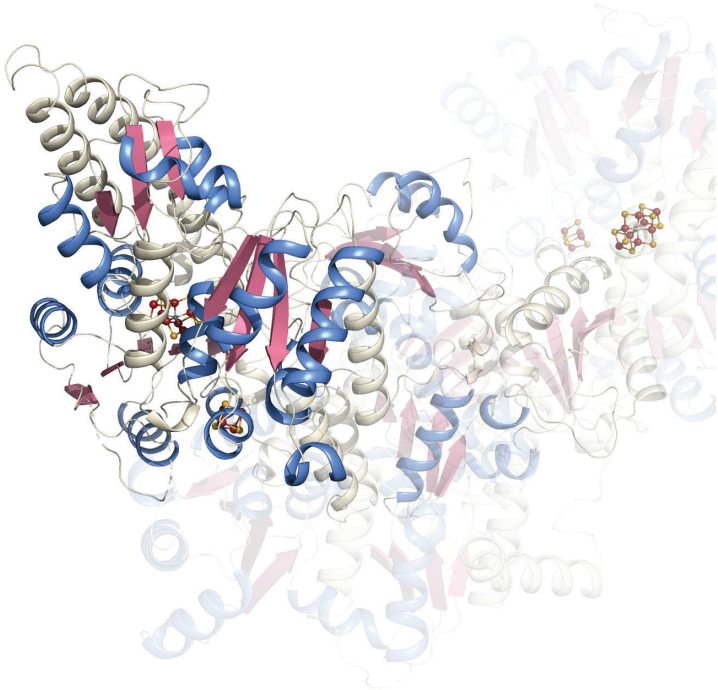
© CEA-Irig/IBS/Y. Nicolet

La nitrogénase est un complexe enzymatique qui permet la fixation biologique de l'azote grâce à la présence de **cofacteurs métalliques***. À travers une étude récente publiée dans Nature Chemical Biology, des chercheurs du **CEA-Irig/IBS**, en collaboration avec le Centro de Biotecnología y Genómica de Plantas, en Espagne, ont dévoilé le caractère dynamique essentiel d'un des acteurs clés pour l'activation de la nitrogénase, assurant protection et transfert efficace durant la biosynthèse de son cofacteur.

L'azote atmosphérique N_2 est, pour l'essentiel, un gaz inerte pour les êtres vivants sur Terre. Autrement dit, nous ne pouvons pas utiliser directement ce composé pourtant vital. Le cycle biochimique de l'azote, et plus particulièrement le rôle joué par certaines bactéries et plantes, est donc essentiel au maintien de la vie sur notre planète.
Chez certains micro-organismes, un processus appelé fixation biologique de l'azote permet de transformer l'azote atmosphérique en formes assimilables par les êtres vivants. Ce processus repose sur l'action d'enzymes sensibles à l'oxygène, les nitrogénases, capables de « *casser* » la molécule d'azote N_2.
Pour fonctionner, ces enzymes ont besoin d'un cofacteur métallique, un composant moléculaire complexe dont la construction requiert plusieurs étapes et l'intervention de nombreuses protéines.

L'une des protéines clés de ce processus est NifEN, qui agit comme une plateforme d'assemblage permettant d'achever les dernières étapes de la formation du cofacteur avant son incorporation dans la nitrogénase, appelée NifDK.

Jusqu'à présent, les bases structurales expliquant comment NifEN accomplit ce rôle central dans la fixation biologique de l'azote restaient inconnues.



Structure de la protéine NifEN déterminée par cryo-microscopie électronique. © CEA

Dans l'étude, publiée dans *Nature Chemical Biology*, les chercheurs ont révélé comment la protéine NifEN accomplit cette fonction. Ils ont eu recours à la cryo-microscopie électronique pour réaliser une analyse structurale à haute résolution de la protéine. Cette technique de pointe leur a permis d'obtenir des images inédites du processus d'assemblage du cofacteur de la nitrogénase. Ces images ont mis en évidence un processus étonnamment dynamique, au cours duquel la protéine NifEN s'ouvre et se referme, certaines de ses régions se déplaçant et se réorganisant pour faciliter le transfert du composé métallique précurseur depuis la surface vers la cavité interne. Les chercheurs ont pu tirer cette conclusion grâce à la découverte cruciale d'intermédiaires montrant la molécule en transit entre ces deux positions.

Ces résultats suggèrent que la transformation du précurseur ne se produit pas à la surface de la protéine, comme on le pensait jusqu'à présent, mais bien au sein de sa cavité interne.
Cette découverte modifie non seulement notre compréhension de la biosynthèse du cofacteur de la nitrogénase, mais elle éclaire également la divergence évolutive entre NifEN, spécialisée dans la construction du cofacteur, et NifDK, responsable de la fixation de l'azote.

Comprendre un tel processus constitue une étape clé vers sa reproduction dans des systèmes non natifs, tels que les cellules eucaryotes. Parvenir à reconstituer la biosynthèse du cofacteur dans ces hôtes pourrait, à terme, permettre l'assemblage d'une nitrogénase pleinement fonctionnelle au sein des cellules végétales, ouvrant ainsi la voie à des cultures capables de fixer leur propre azote et, par conséquent, à une agriculture plus durable et moins dépendante des engrais synthétiques.

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

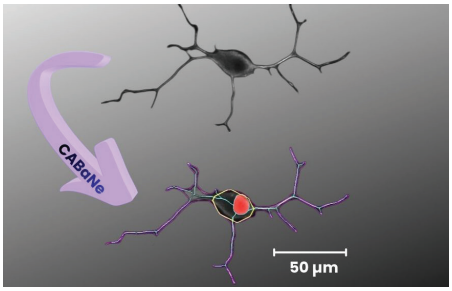
Financements

- Agence Nationale de la Recherche : ANR-15-IDEX-02, ANR-10-INBS-05-02, ANR-17-EURE-0003, ANR-17-EURE-0003
- EXC2008-390540038
- PRE2018-084951,
- RD 289/2021

REFERENCE
Payá Tormo L et al.
Dynamics driving the precursor in NifEN scaffold during nitrogenase FeMo-cofactor assembly
Nature Chemical Biology 2025

Mesurer les neurones autrement grâce à l'automatisation

Elisa Miglioni
Laboratoire Biologie et Biotechnologies pour la Santé



L'équipe BRM du **CEA-Irig/Biosanté** a développé un nouvel outil open source, CABaNe, qui automatise la mesure des neurites et transforme une tâche manuelle et longue en analyse rapide, fiable et accessible, ouvrant le haut débit à toute la communauté neurobiologique.

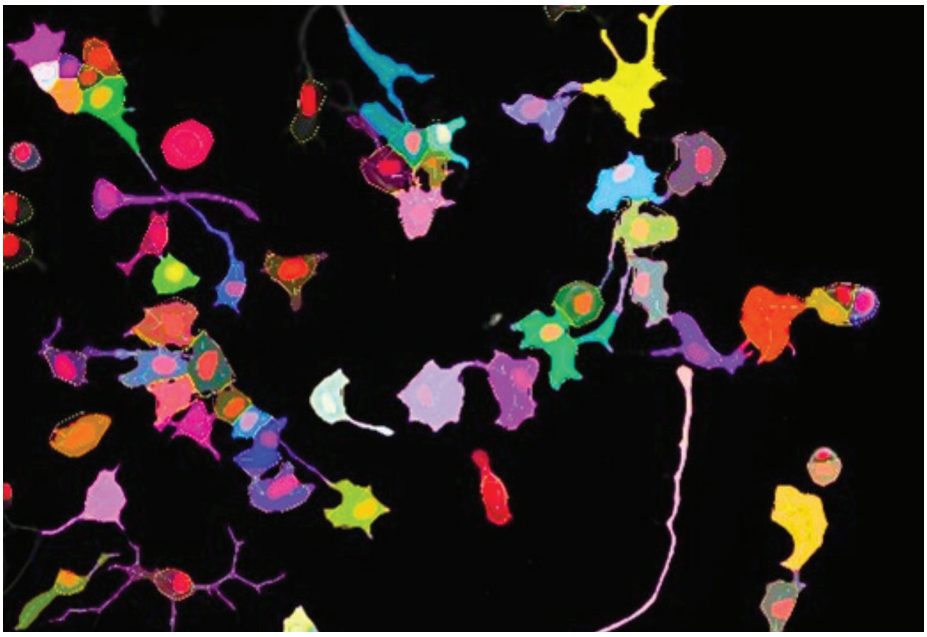
Pour comprendre comment les neurones se développent, se connectent ou réagissent à des traitements, les chercheurs mesurent la longueur de leurs prolongements, les neurites. Une tâche essentielle… mais encore souvent réalisée à la main, image par image. Cette étape lente limite fortement les études à grande échelle pourtant indispensables aujourd'hui. CABaNe apporte une solution simple et gratuite qui automatise totalement cette mesure, rendant ces analyses enfin accessibles à tous les laboratoires.

CABaNe analyse automatiquement les images de neurones en reconnaissant les noyaux, le corps cellulaire et surtout les neurites, qu'il mesure sans intervention humaine. L'outil fonctionne sur n'importe quel ordinateur équipé de *ImageJ* sans expertise technique. Face aux mesures manuelles et à certaines approches de machine learning, il s'avère bien plus rapide tout en restant très précis. CABaNe démocratise ainsi l'analyse à haut débit des neurones et permet de traiter en quelques minutes des données auparavant difficiles à exploiter.

CABaNe simplifie et accélère l'analyse cellulaire en rendant le haut débit accessible et fiable. Il servira de base à de futurs outils et à l'étude d'autres types de cellules ou paramètres.

Financements
- Pfizer, Inserm
- GRAL,Graduate School CBH-EUR-GS
- ANR GlyCON
- Programme "*Investissements d'Avenir*" Glyco@Alps

Collaboration
- Bordeaux Imaging Center, CNRS, France

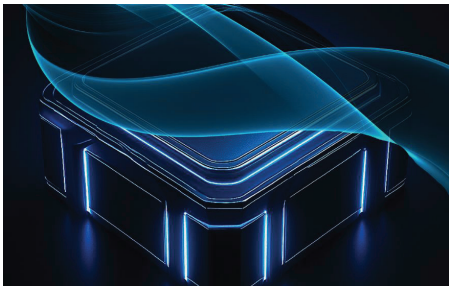


Exemple d'image de neurones différenciés. CABaNe segmente automatiquement les noyaux, les corps cellulaires et les neurites, montrant comment l'outil reconnaît et mesure les prolongements neuronaux sans intervention humaine.

REFERENCE
Thibieroz N, Cordelières F, Machillot P, Singh A, Marchadier L, Picart C and Migliorini E.
CABaNe, an automated, high throughput ImageJ macro for cell and neurite analysis
eNeuro 2025

Le son à sens unique

Olivier Klein
Laboratoire Spintronique et Technologie des Composants



Une équipe du **CEA-Irig/Spintec** a participé au développement d'un nouveau composant unidirectionnel à onde acoustique de surface pour la télécommunication sans fil. Son principe repose sur l'intégration de films minces magnétiques capables de se coupler, par la magnéto-élasticité, à la non-réciprocité inhérente à la dynamique de l'aimantation.

Dans le domaine des technologies de communication sans fil, des filtres frontaux sont placés entre l'antenne et le circuit de traitement du signal pour sélectionner la bande spectrale de fonctionnement. Ces filtres utilisent la lente propagation des ondes sonores dans un cristal pour permettre d'obtenir cette fonction dans un design compact. L'obtention d'une propagation unidirectionnelle au sein de ces dispositifs ouvrirait de nouvelles perspectives fonctionnelles, par exemple par le routage sélectif du signal. Il est bien établi que les matériaux magnétiques brisent intrinsèquement la symétrie de renversement temporel. Une solution étudiée par les chercheurs serait d'associer un film mince magnétique à un substrat piézoélectrique. En effet, les ondes élastiques à la surface du cristal se coupleraient avec la dynamique de l'aimantation du film mince afin de leur conférer la propriété de non-réciprocité.

Dans ce travail, une équipe du **CEA-Irig/Spintec** a participé à la réalisation d'un isolateur acoustique à ondes de surface (SAW) opérant à température ambiante, en intégrant un film mince de grenat ferrimagnétique d'yttrium-fer ($Y_3Fe_5O_{12}$ YIG) sur un substrat piézoélectrique de niobate de lithium (*cf.* **Figure**). Le choix du YIG, un matériau ayant un très faible amortissement magnétique et acoustique, permet un couplage fort entre les ondes magnétiques et sonores.

Les analyses des spectres d'absorption montrent plusieurs pics correspondant à des modes d'ondes de spin perpendiculaire stationnaire. Ces modes présentent la forte non-réciprocité recherchée lorsque la direction de propagation de l'onde acoustique est inversée.

Ces résultats démontrent que les dispositifs intégrés YIG–SAW constituent une plateforme efficace pour le transport acoustique non réciproque. Ils ouvrent ainsi la voie à une nouvelle génération de matériaux diélectriques hybrides combinant piézoélectricité et ferromagnétisme.

Financements

- Q-SPIN chaire d'excellence LANEF portée avec le Prof. YoshiChika Otani

Collaboration

- RIKEN et Institute for Solid State Physics (ISSP) Université de Tokyo (Japon)

REFERENCE
Y. Ba, J. Puebla, K. Yamamoto, Y. Hwang, L. Liao, S. Maekawa, O. Klein, and Y. Otani
Nonreciprocal Resonant Surface Acoustic Wave Absorption in $Y_3Fe_5O_{12}$
Physical Review B 2025

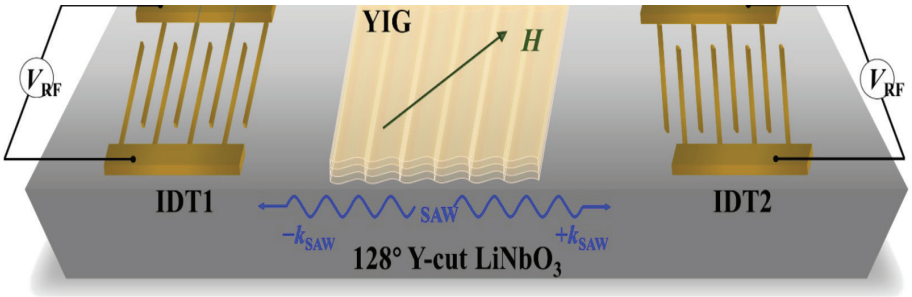


Figure : filtre à ondes acoustiques de surface (SAW) : deux transducteurs interdigités (IDT1 et IDT2) génèrent des ondes élastiques de surface dans un cristal piézoélectrique, qui interagissent ensuite avec un film mince de grenat magnétique déposé sur la même surface. © CEA

Communiqués - Prix - Media

Geneviève Blondin responsable de l'équipe Physicochimie des Métaux en Biologie au **CEA-Irig/LCBM** a reçu la médaille Luigi Sacconi décernée par la fondation du même nom et par la Division de Chimie Inorganique de la Société Italienne de Chimie. Ce prix récompense sa carrière et ses importantes contributions dans le domaine de la chimie inorganique. ***En savoir*** +

Christophe Marcenat chercheur au **CEA-Irig/Pheliqs/Lateqs** a été honoré par le Prix international 2025 de l'Académie Slovaque des Sciences en sciences naturelles. Ce prix récompense un parcours scientifique exceptionnel, et aussi une belle réussite de coopération scientifique européenne. ***En savoir*** +

Bernard DIENY Directeur de recherche au laboratoire **CEA-Irig/Spintec** a reçu le Prix Clément Codron de l'Académie des Sciences pour ses travaux sur les aspects fondamentaux de l'électronique de spin et ses applications pour l'enregistrement magnétique et l'électronique ultra-basse consommation. Il explore aussi l'interface magnétisme-biologie pour des traitements innovants du cancer ou du diabète. ***En savoir*** +

2è Conférence Bernard Bigot

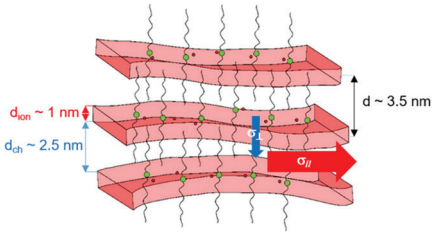
LES NEZ ARTIFICIELS

Exposé par le **Dr Yanxia Hou-Broutin** Directrice de Recherche au CNRS et Responsable du Laboratoire **CREAB** (Chimie pour la Reconnaissance et l'Étude d'Assemblages Biologiques) au Laboratoire **SyMMES** (UMR 5819 CEA-CNRS-UGA-GreINP). ***Replay vidéo***

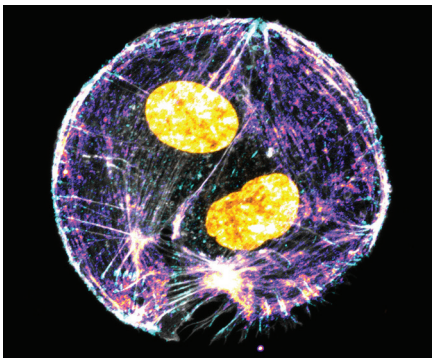
L'Atelier Arts Sciences (CEA & Hexagone Scène Nationale) a accueilli les 9 et 10 octobre 2025 l'artiste Guillaume Cousin pour une séance exploratoire, en compagnie de chercheurs du laboratoire **CEA-Irig/Pheliqs**.
Les scientifiques ont présenté leurs travaux sur la physique quantique. Une rencontre organisée dans le cadre du projet « Tendances Quantiques » initié en 2024 par l'Atelier Arts Sciences. ***En savoir*** +

La mosaïcité dynamique, clé du transport ionique dans la matière molle fonctionnelle

Un consortium de scientifiques incluant des chercheurs du CEA-Irig/SyMMES a mis en évidence pour la première fois le rôle déterminant de la mosaïcité dynamique dans la conduction ionique de la matière molle. ***En savoir +***



Autres résultats scientifiques des laboratoires



Valse des cellules : la plus forte mène la danse

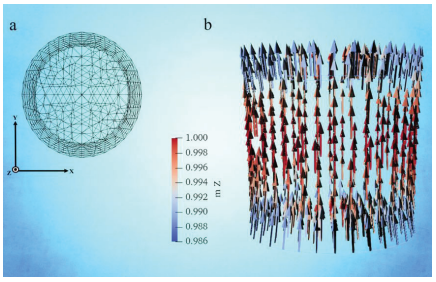
Les cellules, lorsqu'elles interagissent entre elles au sein d'un groupe, peuvent adopter un comportement collectif. Nous avons montré qu'un duo de cellules pouvait ainsi se mettre à tourner spontanément dans un sens préférentiel.
Nos travaux démontrent que le niveau de force produit par les cellules du duo sur leur surface d'adhésion contrôle la direction de cette rotation.

LPCV

Reconnaissance séquence-spécifique d'ADN double brin : sondes luminescentes et dommages photo-induits

Le projet ANR RECODNA, porté par **Olivier Sénèque** chercheur CNRS au **CEA-Irig/LCBM** développe des sondes luminescentes originales, combinant une protéine reconnaissant une séquence d'ADN particulière et des lanthanides.

LCBM



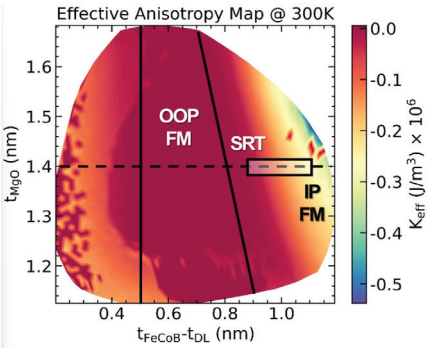
SPINTEC

Commutation induite par courant dans les nanopiliers 3D

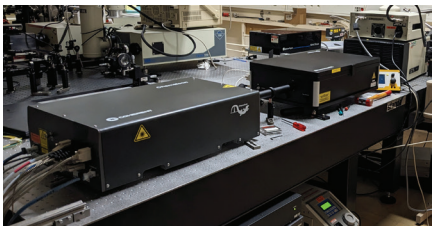
Nous avons simulé la commutation induite par courant de l'orientation magnétique de courts nanopiliers en tant que couche libre dans une jonction tunnel magnétique. Il est essentiel de tenir compte de l'accumulation de spin dans ces éléments 3D, car elle entraîne une augmentation du champ et aussi l'excitation de modes FMR non uniformes.

Contrôle de l'anisotropie pour une commutation efficace à température cryogénique

L'article traite du contrôle de l'anisotropie perpendiculaire de l'interface pour le fonctionnement cryogénique, illustré dans une cellule à jonction tunnel magnétique perpendiculaire (pMTJ) écrite par couple de transfert de spin (STT-MRAM). Une méthode expérimentale originale a été développée pour extrapoler les propriétés magnétiques des couches minces mesurées à température ambiante aux propriétés des dispositifs électriques à des températures cryogéniques).



SPINTEC



Nouvelle source laser ultraviolet @ NPSC

Une nouvelle source laser émettant à 195 nm vient compléter notre précédente source UV à 244 nm. Ce type de source est plutôt rare dans les laboratoires de spectroscopie optique !

PHELIQS

© Photo : A. Aubert / CEA

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

cea irig

Institut de Recherche Interdisciplinaire de Grenoble

Suivez-nous sur LinkedIn

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 : Jordan Berton, Christel Carles, Thierry Douki, Olivier Klein, Elisa Migliorini, Yvain Nicollet, Vincent Nivière, Vivien Schmitt, Emmanuel Taillebourg, Tristan Wagner, Alain Farchi, Emmanuelle Neumann, Mathilde Costes-Majorel

cea cnrs Inserm UGA Université Grenoble Alpes INRAE