

Comment disparaissent les photons ?

Les photons sont des grains de lumière qui se propagent dans le vide avec une énergie bien définie. Lorsqu'ils interagissent avec la matière, ils peuvent se transformer en photons d'énergie différente. Ainsi, deux photons peuvent fusionner en un nouveau photon dont l'énergie est la somme des énergies des photons initiaux. C'est la non-linéarité de l'interaction entre la lumière et la matière qui rend ce processus possible. Inversement, un photon peut-il disparaître spontanément, en produisant des photons d'énergie plus petite, lorsqu'il traverse un cristal ? Alors que ce processus est classiquement interdit, la physique quantique l'autorise. Il a même été utilisé pour produire des paires de photons intriqués. Cependant, cette fission spontanée d'un photon visible ou infra-rouge est extrêmement peu efficace : elle ne concerne que quelques photons par million.

Dans les réseaux de jonctions Josephson entre îles supraconductrices, les oscillations de la différence de phase supraconductrice se propagent comme les photons lumineux, mais aux fréquences micro-ondes. L'avantage de ces réseaux est qu'il est possible d'introduire une non-linéarité extrêmement forte pour ces photons en réduisant la taille des jonctions. Une petite jonction en série avec une chaîne homogène de grosses jonctions agit comme un qubit couplé à une ligne de transmission. La non-linéarité provient de la modulation de l'énergie du qubit par la charge électrique dans son environnement. Cette modulation est attribuée à des « sauts quantiques » de la différence de phase à la petite jonction. *Comme l'énergie du qubit dépend de la charge, les sauts de phase quantiques couplent un photon quasi-résonant avec les photons de basse énergie.* Avec un chercheur de l'Université de Yale, les scientifiques de l'Irig ont établi que ce couplage devient particulièrement efficace pour briser un photon résonant en un photon quasi-résonant accompagné de plusieurs photons de basse énergie.

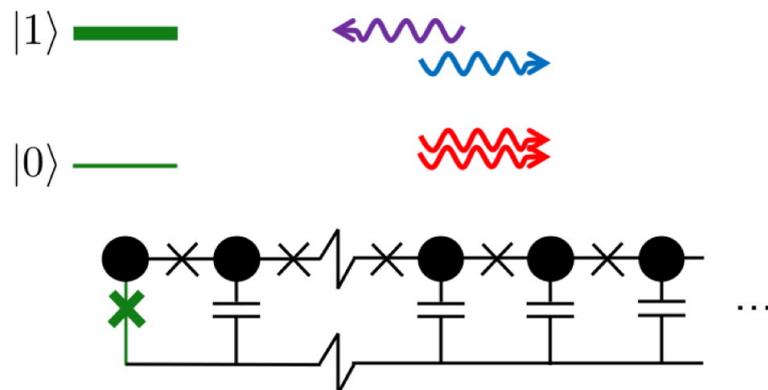
Le temps de vie des photons a été mesuré dans plusieurs circuits supraconducteurs à l'Université du Maryland. La théorie, qui attribue la disparition des photons résonants aux sauts de phase quantiques, a permis à ces chercheurs d'interpréter les résultats pour des circuits caractérisés

par une impédance de la ligne de transmission supérieure au quantum de résistance. En dehors de ce régime, d'autres processus entrent en compétition avec les sauts de phase quantiques. À ce jour, il n'existe pas de théorie pour en rendre compte. De ce point de vue, les expériences ont réalisé une « simulation quantique » d'un problème d'impureté quantique : le qubit couplé à son environnement. La photonique micro-ondes apparaît comme un domaine prometteur pour étudier d'autres systèmes quantiques complexes.

RÉFÉRENCES

- Houzet H and Glazman LI. Critical fluorescence of a transmon at the Schmid transition. *Physical Review Letters*, 2020
Kuzmin R, Grabon N, Mehta N, Burshtein A, Goldstein M, Houzet M, Glazman LI and Manucharyan VE. Inelastic scattering of a photon by a quantum phase slip. *Physical Review Letters*, 2021

Contact : [Manuel Houzet](#)
[Phelips](#)
Photonique Électronique et Ingénierie
Quantiques



Lorsqu'un qubit supraconducteur (vert) entre en résonance avec un photon micro-onde (violet) qui se propage dans une ligne de transmission (noir), il peut le briser très efficacement en un photon quasi-résonant (bleu) et plusieurs photons de basse énergie (rouge).

Architectures tridimensionnelles du phytoplancton au service du métabolisme énergétique

Le phytoplancton joue un rôle essentiel dans le maintien de la vie sur Terre. En transformant le CO₂, la lumière du soleil et les nutriments en biomasse et en oxygène, les organismes unicellulaires qui composent le phytoplancton sont responsables d'environ 50 % de la **production primaire**. Ils contribuent aux réseaux alimentaires et à la pompe biologique, un élément majeur du cycle marin du carbone qui permet la fixation du CO₂ dans les océans par sédimentation des microalgues. Comprendre les bases cellulaires de la réponse du phytoplancton face aux changements environnementaux pourrait inspirer des développements prometteurs en biotechnologie.

Jusqu'à présent, les caractéristiques morphologiques du phytoplancton étaient principalement visualisées par des études de microscopie optique, de microscopie confocale tridimensionnelle (3D) et de microscopie électronique bidimensionnelle (2D). Cependant, ces études fournissent des images présentant une résolution insuffisante pour révéler l'ultrastructure cellulaire, et la microscopie électronique 2D ne peut pas fournir une description volumétrique complète de ces cellules et de leurs organites.

Une collaboration entre plusieurs laboratoires de l'Irigr (LPCV, IBS, MEM) a permis la reconstruction 3D de l'architecture cellulaire d'eucaryotes représentatifs des principales familles du phytoplancton (Figure), grâce à la microscopie électronique à balayage à faisceau d'ions focalisé (FIB-SEM) [1]. Les images obtenues grâce au FIB-SEM constituent une ressource unique qui a permis d'identifier les propriétés des architectures subcellulaires qui ont été maintenues au cours de l'évolution du plancton. Il s'agit d'une part de la conservation du volume occupé par les principaux organites d'une part, et d'autre part, de la préservation des rapports volumétriques et de la proximité entre les organites producteurs d'énergie que sont la mitochondrie et le plaste.

En révélant comment une interaction intime entre structures cellulaires et réponses physiologiques permet aux cellules de s'adapter à diverses conditions environnementales, ces résultats permettent d'éclairer les bases cellulaires de la flexibilité du métabolisme énergétique du phytoplancton. Grâce à la conjonction de **nombreuses expertises**, les chercheurs ont montré l'existence d'un lien étroit entre l'interaction mitochondrie-plastes et la capacité de production de biomasse algale en mixotrophie (i.e. la synergie entre respiration et photosynthèse) chez la microalgue extrémophile *Galdieria sulphuraria* [2], la microalgue oléagineuse *Microchloropsis gaditana* [1, 4], et la diatomée

modèle *Phaeodactylum tricornutum* [3] ont pu être caractérisés.

Cette étude montre que les réponses physiologiques du phytoplancton reposent sur des caractéristiques spécifiques de leur principaux organites (plastes et mitochondries), ouvrant des perspectives d'exploitation dans le domaine de la production de biomasse algale en amont d'applications en biotechnologies.

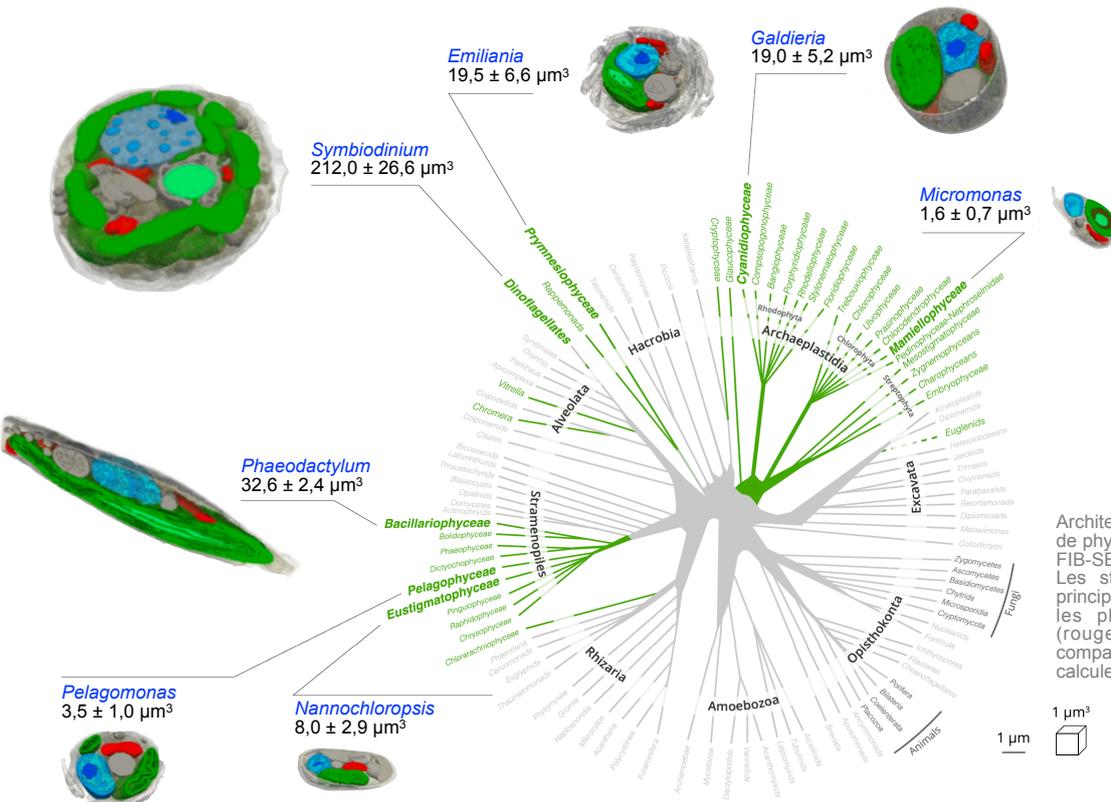
La **production primaire** est la vitesse à laquelle l'énergie est convertie en substances organiques par les organismes photosynthétiques (photoautotrophes) terrestres et aquatiques.

Ces **expertises** impliquent la cryo-tomographie électronique réalisée au laboratoire MEM et à l'IBS, la photophysologie, la lipidomique et l'ingénierie métabolique effectuées au LPCV, la protéomique au laboratoire Biosanté, la métabolomique à l'Université Heinrich Heine de Düsseldorf en Allemagne et à l'Université de Liège en Belgique, et enfin la modélisation du métabolisme à l'Université Oxford Brookes au Royaume Uni.

Ces études ont été réalisées grâce au financement de l'ANR « MoMix », la communauté européenne (ERC AdG « Chloromito ») et grâce à des collaborations avec la société Fermentalg [3] et le groupe Total pétrochimie [4].

RÉFÉRENCES

- [1] Uwizyeze C, Decelle J, Jouneau PH, Flori S, Gallet B, Keck JB, Bo DD, Moriscot C, Seydoux C, Chevalier F, Schieber NL, Templin R, Allore G, Courtois F, Curien G, Schwab Y, Schoehn G, Zeeman SC, Falconet D and Finazzi G. Morphological bases of phytoplankton energy management and physiological responses unveiled by 3D subcellular imaging. *Nature Communications*, 2021
- [2] Curien et al. Mixotrophic growth of the extremophile *Galdieria sulphuraria* reveals the flexibility of its carbon assimilation metabolism. *New Phytologist*, 2021
- [3] Villanova et al. Boosting biomass quantity and quality by improved mixotrophic culture of the diatom *Phaeodactylum tricornutum*. *Frontiers in Plant Science*, 2021
- [4] Dal Bo et al. Consequences of mixotrophy on cell energetic metabolism in *Microchloropsis gaditana*, revealed by genetic engineering and metabolic approaches. *Frontiers in Plant Science*, 2021



Architecture cellulaire interne des cellules de phytoplancton obtenue à partir d'images FIB-SEM de cellules entières. Les structures mettent en évidence les principaux compartiments subcellulaires : les plastides (vert), les mitochondries (rouge), le noyau (bleu), les autres compartiments (gris), et permettent d'en calculer le volume.

Contacts : [Giovanni Finazzi](#)
[LPCV](#)
 Laboratoire Physiologie Cellulaire & Végétale

Imagerie :
[Denis Falconet](#)
[Johan Decelle](#)
[Pierre-Henri Jouneau](#)
[Guy Schoehn](#)

Métabolisme énergétique :
[Gilles Curien](#)

Une fusion réussie pour un intermédiaire clé vers le site actif de la nitrogénase

Certaines bactéries sont capables de fixer l'azote atmosphérique et de le transformer en ammoniacque à température ambiante, une réaction d'une importance capitale pour les plantes (cycle de l'azote). L'enzyme responsable de cette réduction est la nitrogénase, une métalloprotéine qui utilise deux centres métalliques: le P-cluster et le FeMo-co. Le premier est un centre atypique [Fe₈S₇] qui permet le transfert d'électron vers le FeMo-co. Ce dernier est le site actif proprement dit et correspond à un centre organométallique [MoFe₇S₉C-(R)-homocitrate]. Alors que le mécanisme réactionnel de la nitrogénase fait toujours l'objet d'âpres débats, les processus responsables de la production et l'insertion du FeMo-co dans l'enzyme sont loin d'être décryptés et sont également sources d'intenses controverses.

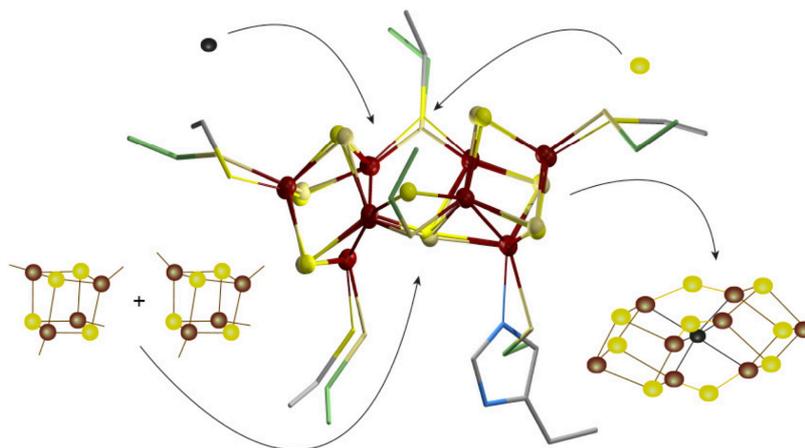
La biosynthèse du FeMo-co nécessite l'action d'une douzaine de protéines accessoires regroupées dans la machinerie d'assemblage NIF (*Nitrogen Fixation*). La protéine NifB est l'enzyme clé de ce processus car elle est responsable de la fusion de deux centres [Fe₄S₄] et de l'insertion d'un ion carbure et d'un ion sulfure pour produire un précurseur [Fe₈S₉C] appelé NifB-co. Des chercheurs de l'Irig étudient les mécanismes catalytiques de métalloenzymes contenant des métaux de transition, mais aussi les mécanismes de synthèse et d'insertion de ces sites métalliques dans les enzymes au sein desquels ils doivent être insérés. En 2020, en collaboration avec l'Universidad Politécnica de Madrid, ils ont publié la première structure cristalline de la protéine NifB, représentant un état précoce de la réaction de synthèse du NifB-co. Ces travaux ont été rapidement suivis par une autre publication d'une équipe de chercheurs américains rapportant une structure cristalline avec l'ensemble des centres métalliques présents. Malheureusement, cette équipe a mal modélisé leurs données cristallographiques et a de ce fait été dans l'incapacité d'identifier correctement le contenu du site actif.

En reprenant ces données cristallographiques, les chercheurs de l'Irig ont pu mettre en évidence la présence inattendue d'un centre [Fe₈S₈] résultant de la fusion des centres [Fe₄S₄]. Cette structure cristalline permet de ce fait de redéfinir l'ordre des réactions montrant que la fusion des centres FeS doit avoir lieu avant l'insertion de l'ion carbure. La coordination particulière de cet intermédiaire montre clairement le rôle de la matrice protéique dans l'organisation des étapes de biosynthèse du NifB-co, dévoilant ainsi le mécanisme de l'enzyme.

RÉFÉRENCE

Jenner LP, Cherrier MV, Amara P, Rubio LM and Nicolet Y. An unexpected P-cluster like intermediate en route to the nitrogenase FeMo-co. *Chemical Science*, 2021

Contact : [Yvain Nicolet](#)
IBS
Institut de Biologie Structurale



Le K-cluster : un nouvel intermédiaire dans la synthèse du NifB-co, avec une structure tridimensionnelle et une coordination similaires au P-cluster. Vision schématisée des différents événements permettant la fusion de deux centres [Fe₄S₄] (à gauche) conduisant au K-cluster (au centre) et superposé à la structure cristalline du P-cluster de la nitrogénase), puis l'arrivée de l'ion carbure et de l'ion sulfure afin de produire le NifB-co (à droite).

Well Plate Maker : une application conviviale pour limiter des biais dans les études biomédicales à grande échelle

Avec l'augmentation constante du débit des pipelines instrumentaux utilisés dans la recherche biomédicale, il devient possible d'analyser des centaines d'échantillons, couvrant ainsi diverses conditions biologiques et **facteurs de confusion**. Bien que ces approches à grande échelle promettent une puissance statistique sans précédent, elles posent de nouveaux défis en termes de conception expérimentale. Notamment, il devient nécessaire d'éviter les effets de lot et de limiter les biais techniques grâce à divers modèles de randomisation.

De nombreux facteurs peuvent influencer les résultats dans la recherche clinique, en particulier les biais dans la distribution des échantillons avant la préparation biochimique. Pour simplifier la tâche fastidieuse consistant à répartir les essais sur plusieurs **plaques de puits** (*Image*) tout en tenant compte des contraintes susmentionnées, des chercheurs de l'Irig ont développé une application facile à utiliser, le **Well Plate Maker** (WPM).

Plusieurs outils existent déjà pour travailler sur les cartes de plaques (coordonnées des échantillons dans une plaque 96 puits par exemple). Cependant, WPM diffère à deux égards. Premièrement, les chercheurs ont conçu WPM pour inclure une interface graphique, ce qui le rend facilement utilisable par des utilisateurs n'ayant aucune compétence en programmation. Deuxièmement, WPM peut être utilisé en amont de l'expérience pour optimiser la conception des cartes de plaques pour lesquelles il est en effet nécessaire d'optimiser la distribution des échantillons sur les plaques de préparation afin de limiter les biais (*Figure*). Pour se faire, il sera nécessaire de spécifier un certain nombre de contraintes, comme l'appartenance à un groupe, des contraintes spatiales ou de voisinage, la taille et le nombre de plaques. Ainsi, dans le cas de plaques multiples, les échantillons sont répartis uniformément entre les différentes plaques en fonction du nombre total d'échantillons et de la taille des groupes, ce qui permet d'éviter les « effets de plaque ». De plus, WPM simplifie la randomisation par blocs pour limiter d'autres types d'effets de lot.

Grâce à sa large gamme d'options, WPM peut être adapté à un large éventail d'applications (analyses omiques, criblage...), permettant de concevoir facilement des cartes de plaques de puits, qui peuvent ensuite être imprimées pour une mise en œuvre en laboratoire. Ainsi Well Plate Maker est utilisé à l'Irig pour distribuer de manière optimale les échantillons de plasma issus de cohortes cliniques, avant leur préparation biochimique et leur analyse protéomique par spectrométrie de masse.

En statistique, un **facteur de confusion**, ou facteur confondant, ou encore variable confondante, est une variable aléatoire qui influence à la fois la variable dépendante et les variables explicatives.

Plaques de puits : ce sont des plaques permettant d'analyser simultanément jusqu'à 96 échantillons différents, contenus dans des puits.

Well Plate Maker est implémenté en R et disponible sur **Bioconductor** sous la licence open source Artistic 2.0. En plus du scripting classique, il peut être utilisé via une interface graphique, développée avec la technologie Shiny.

Ce travail a été soutenu par des subventions de l'Agence Nationale de la Recherche française : Infrastructure nationale ProFI, LabEx GRAL, projet CDP-IDEX LIFE et MIAI @ Grenoble Alpes.

RÉFÉRENCE

Borges H, Hesse AM, Kraut A, Couté Y, Brun V and Burger T. Well Plate Maker: A user-friendly randomized block design application to limit batch effects in large-scale biomedical studies. *Bioinformatics*, 2021

Contact : [Thomas Burger](#)
[Biosanté](#)

Laboratoire Biologie et Biotechnologie
pour la Santé



Plaque 96 puits



Représentation d'une carte des plaques de puits générée par WPM.

Morphologie de membranes hybrides stabilisantes très prometteuses pour pile à combustible

La pile à combustible à membrane échangeuse de protons, **PEMFC** en anglais, convertit l'énergie chimique en électricité pour la prochaine génération de véhicules propres. Parmi les nombreuses caractéristiques attrayantes des PEMFC, les constructeurs apprécient une densité de puissance élevée et un démarrage rapide. Cette révolution nécessite de remplacer le cœur des piles actuellement constitué d'une membrane perfluorée sulfonée, telle que le Nafion®, qui ne répond plus aux exigences: le coût de la nouvelle membrane, son impact environnemental et le maintien de ses propriétés mécaniques au-delà de 80-100 °C sont au cœur des recherches actuelles. Or, les membranes alternatives, comme par exemple le **sPEEK**, présentent deux inconvénients majeurs par rapport aux membranes perfluorées : leur durée de vie est plus courte et leurs performances sont moindres. Cette problématique est actuellement étudiée par les chercheurs de l'Irig dans l'optique de développer une membrane qui permettra un déploiement généralisé des piles à combustible.

Le **sPEEK**, bien que résistant aux températures élevées grâce à ses excellentes propriétés thermomécaniques, reste cependant trop sensible à l'oxydation chimique pendant le fonctionnement en pile. Cette sensibilité entraîne une dégradation drastique de sa durée de vie (quelques centaines d'heures, à comparer aux dizaines de milliers d'heures pour le Nafion®). Toutefois, le sPEEK est un bon candidat pour évaluer rapidement des stratégies de stabilisation. Ainsi, les chercheurs de l'Irig ont employé une méthode jusqu'alors très peu explorée qui consiste à stabiliser chimiquement les membranes. Pour cela, l'hybridation a été appliquée avec succès aux membranes sPEEK [1], ce qui améliore leur stabilité chimique. Une phase sol-gel a été développée par auto-condensation du **MPTMS** au sein de la membrane hôte sPEEK afin de la protéger des espèces oxydantes générées lors de l'utilisation en pile. Il s'agit d'une voie stabilisante sacrificielle où les groupes thiols SH, portés par la phase sol-gel, peuvent être oxydés jusqu'à la formation de groupes acides sulfoniques SO₃H. Cette stratégie, en rupture avec les approches traditionnelles, a permis de concevoir une nouvelle génération de membranes hybrides dotées de capacités d'auto-protection et d'auto-amélioration *operando*. Les équipes ont cherché à comprendre la structure complexe de ces membranes afin de la corrélater aux propriétés fonctionnelles et à la durabilité pour, *in fine*, en optimiser le design [2]. La nanostructure a été explorée à une échelle allant du nanomètre à la centaine de nanomètres, en combinant des techniques de caractérisation AFM/3D FIB-SEM (espace réel) et de diffusion des neutrons aux petits angles (**SANS**) / et des rayons X aux grands angles (**WAXS**) (espace réciproque). Les images AFM en module ont montré que la phase sol-gel est distribuée en grands domaines sphériques dont la taille varie de 100nm à 200nm selon la teneur en sol-gel. Le SANS (Institut Laue-Langevin à Grenoble), combiné à la technique de variation de contraste, a permis deux observations importantes : d'une part, les canaux ioniques du sPEEK ne sont pas obstrués (conduction

ionique préservée) car ils sont seulement comprimés par l'insertion de la phase sol-gel; d'autre part cette phase a une structure de type multi-échelle, comme des agrégats constitués de particules élémentaires (Figure 1). Ces observations montrent que les nanoparticules de sol-gel se développent dans les zones appelées « interbundles » de la membrane sPEEK hôte (Figure 2).

Cette étude expérimentale pluridisciplinaire et multi-échelle a permis d'aborder la question de la distribution et de la localisation idéale de la phase sol-gel pour une efficacité de la stabilisation chimique. Les perspectives de ces travaux consistent à explorer l'hybridation par une phase sol-gel stabilisante régénérative, une voie très prometteuse pour accroître la durée de vie des membranes.

PEMFC : proton exchange membrane fuel cells.

sPEEK : poly(éther-éther-cétone sulfoné). Une alternative possible au Nafion® pour les piles à combustible à membrane échangeuse de protons, en raison de ses nombreuses propriétés, notamment son faible coût et sa faible perméabilité aux gaz, sa disponibilité, sa bonne conductivité protonique, sa grande stabilité thermique mais une stabilité chimique médiocre.

MPTMS : 3-(mercaptopropyl)triméthoxysilane.

SANS : Small Angle Neutron Scattering.

WAXS : Wide Angle X-Ray Scattering.

RÉFÉRENCES

[1] Huynh N, Fernandes JPC, Bayle PA, Bardet M, Espuche E, Dillet J, Perrin JC, El Kaddouri A, Lottin O, Mareau VH, Mendil-Jakani H and Gonon L. Sol-gel route: An original strategy to chemically stabilize proton exchange membranes for fuel cell. *Journal of Power Sources*, 2020

[2] Huynh N, Cosas Fernandes JP, Mareau VH, Gonon L, Pouget S, Jouneau PH, Porcard L and Mendil-Jakani H. Unveiling the multiscale morphology of chemically stabilized proton exchange membranes for fuel cells by means of Fourier and real space studies. *Nanoscale Advances*, 2021

Contact : [Hakima Mendil-Jakani](#)
[SyMMES](#)

Système Moléculaires et nanoMatériaux
pour l'Énergie et la Santé

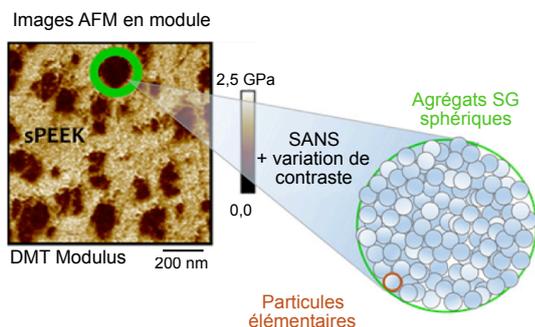


Figure 1. Image AFM en module d'une membrane hybride contenant environ 30 % de phase sol-gel (haut). Sous la loupe, un agrégat de sol-gel sphérique constitué de particules élémentaires sphériques.

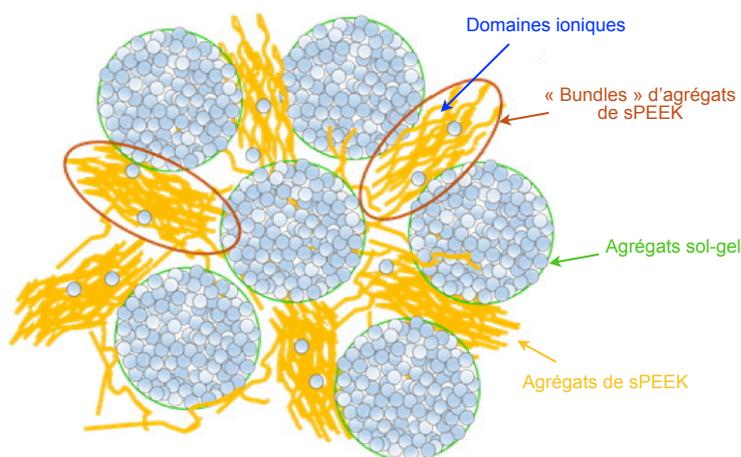


Figure 2. Modèle structural multi-échelle des membranes hybrides.

L'enzymologie de la modification des ARNt : un trésor pour les biochimistes

La biosynthèse des ARN implique de nombreux événements biochimiques essentiels à leur maturation. D'un point de vue enzymatique, le phénomène de modification des nucléosides est certainement l'un des plus remarquables de ces événements. Il permet en effet une multitude de changements structuraux au niveau des bases canoniques adénosine, guanosine, cytosine et uridine. Un certain nombre de ces modifications, qui résultent de processus complexes (hyper-modifications), ont été caractérisées et sont principalement localisées aux positions 34 et 37 des ARN de transfert (ARNt) dans la boucle dite « anticodon » (Figure). Elles sont particulièrement intéressantes car elles sont connues pour optimiser la fonction de décodage de l'ARN messager en contrôlant directement les interactions codon-anticodon. Les enzymes catalysant la modification des nucléosides sont des cibles fondamentales pour la recherche, car elles permettent d'étudier les interactions protéine-ARN et sont impliquées dans certaines maladies. Malgré la richesse des données génétiques, physiologiques et biochimiques de la voie de biosynthèse de la modification de l'adénine 37 de certains ARNt (voie de biosynthèse du groupement ms^2io^6A37), très peu de données structurales sont disponibles concernant les enzymes catalysant cette hyper-modification.

Depuis quelques années, des chercheurs de l'Irig étudient les enzymes impliquées dans la voie de biosynthèse conduisant à la formation du **nucléoside hyper-modifié** ms^2io^6A37 . Cette hyper-modification est le résultat d'une séquence de réactions enzymatiques catalysées successivement par les enzymes **MiaA**, **MiaB** et **MiaE**, dont les deux dernières appartiennent à la classe des métallo-enzymes. En combinant des méthodes biochimique, spectroscopique et cristallographique, les chercheurs de l'Irig ont identifié les éléments structuraux de MiaE qui permettent l'amarrage de l'enzyme avec l'ARNt et la canalisation de l'oxygène moléculaire, ces deux événements étant les primo-processus essentiels qui initient la transformation d'hydroxylation.

La structure cristallographique de l'enzyme MiaE de *Pseudomonas putida* (pp-MiaE) a été obtenue par les chercheurs. Cette structure se présente sous la forme d'un domaine unique et compact qui se compose essentiellement d'un faisceau de quatre hélices- α antiparallèles abritant un centre catalytique à deux atomes de fer. Ces deux ions métalliques sont coordonnés par des histidines et des glutamates, et sont pontés par un atome d'oxygène caractérisé comme étant du type « μ -oxo » par spectroscopie. Deux canaux fonctionnels ont été identifiés. Le premier a été cartographié en utilisant des atomes de krypton (substitut de l'oxygène) introduits sous pression dans les cristaux de Pp-MiaE. Ce canal de nature hydrophobe, est incontestablement la voie d'acheminement de l'oxygène moléculaire vers le site actif pour la catalyse. Le second canal, de nature polaire, est interprété comme étant une vaste cavité permettant d'accueillir stéréosélectivement la partie anti-codon de l'ARNt et de positionner la base adénine 37 à proximité du site actif

afin de faciliter l'hydroxylation de sa partie isopentényle. Un modèle structural du complexe MiaE-ARNt a été simulé sur la base des structures cristallographiques, des résultats biochimiques et spectroscopiques. Ce modèle révèle qu'une boucle flexible non canonique de l'enzyme MiaE, chargée positivement, est vraisemblablement impliquée dans les processus de reconnaissance et d'amarrage de l'ARNt.

L'ensemble de ces résultats ouvrent la voie à la compréhension des mécanismes impliqués dans la reconnaissance enzyme-substrat dans le cadre des réactions de modification des ARNt.

Ce **nucléoside hyper-modifié** est le 2-méthylthio-N6-(cis-hydroxy)isopentényl-adénosine (ms^2io^6A37) qui est présent en position 37 adjacente à l'anticodon de certains ARNt.

MiaA permet l'ajout du groupe isopentényl sur l'azote exocyclique N6 de l'adénosine, convertissant l'ARNt-A37 en ARNt- i^6A37 .

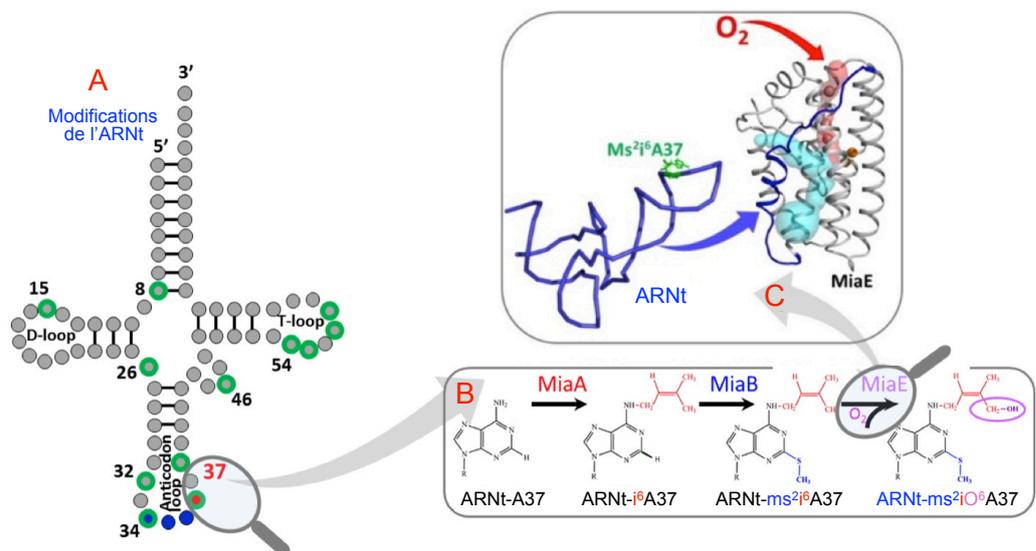
MiaB est une enzyme de la famille des Radical-SAM qui catalyse l'insertion du groupement thiométhyl en position 2, en convertissant ARNt- i^6A37 en ARNt- ms^2i^6A37 .

MiaE fait partie de la famille des protéines avec un centre à fer non-hémérique. Cette famille se compose d'enzymes extrêmement diversifiées, identifiées dans tous les règnes du vivant, qui catalysent un nombre impressionnant d'oxydations chimiques différentes.

RÉFÉRENCE

Carpentier P, Leprêtre C, Basset C, Douki T, Torelli S, Duarte V, Hamdane D, Fontecave M and Atta M. Structural, biochemical and functional analyses of tRNA-monooxygenase enzyme MiaE from *Pseudomonas putida* provide insights into tRNA/MiaE interaction. [Nucleic Acids Research](#), 2020

Contact : [Mohamed Atta](#)
CBM
Laboratoire Chimie et Biologie des Métaux



A - Modifications typiques des ARNt (en vert), dont celles en position 37 sur la boucle de l'anticodon (anticodon loop).

B - Détails de l'hyper-modifications A37 de l'ARNt catalysées successivement par les enzymes MiaA, MiaB et MiaE.

C - Structure de l'enzyme MiaE, le canal à oxygène est en rouge, la cavité abritant l'ARNt est en bleu clair. L'ARNt est en bleu et la base à modifier est en vert.

La spintronique mise sur le biface Janus SPtSe

Un nouveau matériau biface *Janus* SPtSe a été conçu par les chercheurs de l'Irigr pour des applications potentielles dans le domaine des mémoires magnétiques et ferroélectriques. Ce matériau bidimensionnel fait partie de la famille des dichalcogénures (atomes de S, Se ou Te) de métaux de transition (TMDC), qui sont recherchés pour leurs propriétés électroniques, photoniques, catalytiques ou magnétiques, intimement liées aux détails de leur structure 2D.

La problématique in fine de cette recherche est d'intensifier le *couplage spin-orbite de Rashba* dans les TMDC, couplage qui génère une accumulation de spin à partir d'un simple courant de charge circulant dans le matériau (Figure 1). Les spins qui s'accumulent dans la couche vont pouvoir diffuser pour former un courant de spins qui va être absorbé par une couche magnétique en contact avec le TMDC, ce qui entraîne l'inversement de l'aimantation de cette couche. Grâce au couplage spin-orbite de Rashba, l'application d'un courant électrique permet d'orienter l'aimantation de la couche magnétique et ainsi d'écrire un bit d'information «0» ou «1». Plus le couplage Rashba est fort, plus le courant de spin généré est intense et permet de renverser facilement l'aimantation de la couche, et donc de limiter la consommation d'énergie de ce type de mémoires magnétiques.

Intrinsèquement, le TMDC PtSe₂ possède une forte interaction spin-orbite (grâce aux atomes lourds de platine). Cependant, il résidait un problème majeur dans le choix de ce matériau à cause de sa structure symétrique verticale qui limite le couplage Rashba. En effet, SePtSe est composé de deux couches identiques de chalcogène Se enveloppant une couche centrale de métal Pt (Figure 2, en bas à gauche).

Les chercheurs de l'Irigr ont réussi à lever cet obstacle en substituant les atomes de Se dans la couche supérieure, au moyen d'une sulfuration contrôlée sous atmosphère de H₂S, pour en faire un matériau bidimensionnel asymétrique, dit *Janus* S/Pt/Se (Figure 2, en bas à droite). Ce nouveau matériau présente un fort couplage Rashba.

Afin de former le Janus SPtSe, le matériau TMDC PtSe₂ est d'abord chauffé à 370 °C pour générer des lacunes dans la couche supérieure. Cette couche est alors exposée à une température contrôlée de 350 °C sous atmosphère de H₂S pour combler ces lacunes et obtenir la substitution du Se par S. En refroidissant, le nouveau composé 2D se réordonne. Il est évidemment nécessaire de maîtriser parfaitement les étapes de formation des couches d'atomes S, Pt, et Se afin d'exploiter au mieux les propriétés du Janus SPtSe du point de vue de la spintronique. Ces étapes ont été étudiées grâce aux moyens spécifiques de caractérisation qui existent au sein de l'Irigr. Les étapes de formation du composé Janus ont ainsi été méthodiquement caractérisées *in situ* et *operando* par diffraction des rayons X synchrotron en incidence rasante à l'ESRF. La composition atomique biface Janus a, elle, été vérifiée *ex situ* par spectroscopie de photoémission des rayons X résolue en angle.

Ce composé Janus est une première réalisation expérimentale dont le fort couplage spin-orbite de Rashba pourrait améliorer l'efficacité en écriture des mémoires magnétiques à couple de spin de type *SOT-MRAM* et ainsi limiter la consommation d'énergie nécessaire.

Contacts : [Gilles Renaud](#)

[MEM](#)

Modélisation et Exploration des

Matériaux

[Matthieu Jamet](#)

[Spintec](#)

Spintronique et Technologie des

Composants

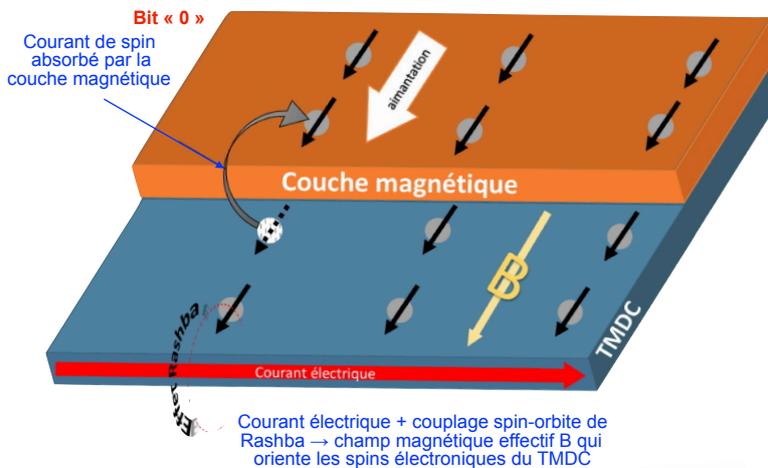


Figure 1. Effet du couplage spin-orbite de Rashba dans une couche de TMDC et écriture de la couche magnétique.

RÉFÉRENCE

Sant R, Gay M, Marty A, Lisi S, Harrabi R, Vergnaud C, Dau MT, Weng X, Coraux J, Gauthier N, Renault O, Renaud G and Jamet M. Synthesis of epitaxial monolayer Janus SPtSe. *npj 2D Materials and Applications*, 2020

Couplage spin-orbite de Rashba. Cet effet relativiste, dans lequel un champ électrique est ressenti comme un champ magnétique par le couplage spin-orbite, permet de générer un courant de spin à partir d'un courant de charge. Il permet en quelque sorte de trier dynamiquement les spins (up et down) dans le matériau.

Par exemple, dans le SPtSe, la rupture de symétrie par rapport au plan d'atomes de platine crée un dipôle électrique vertical. Le champ électrique ainsi créé, couplé au platine qui est un élément lourd, génère un fort couplage spin-orbite de Rashba.

De cette façon, une telle monocouche pourrait servir dans une mémoire magnétique de type *SOT-MRAM* (Spin-Orbit Torque Magnetic Random-Access Memory) pour l'écriture de la couche magnétique de stockage.



Janus. La référence au Dieu grec à deux faces Janus est due à la structure typique du matériau dans lequel les deux couches de chalcogène (S et Se) autour de la couche de Pt ont une nature chimique différente.

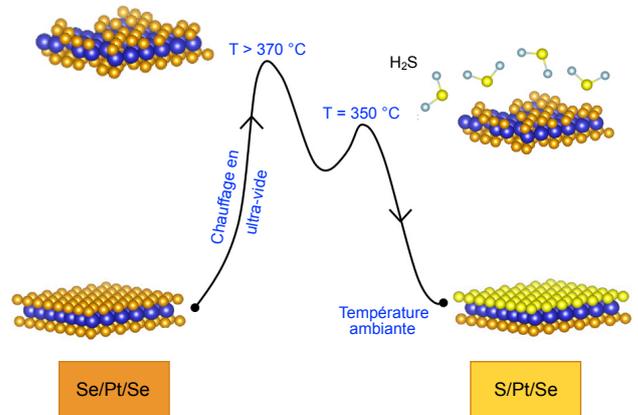


Figure 2. Schéma de la transformation de PtSe₂ en SPtSe. Atomes : Pt en bleu, Se en orange, S en jaune.

Diminuer l'impact environnemental des mémoires magnétiques perpendiculaires

Le secteur des technologies de l'information et de la communication connaît depuis trois décennies une très forte croissance portée par une demande forte des consommateurs et par des progrès technologiques remarquables. En parallèle, depuis quelques années, la demande sociétale pour une croissance maîtrisée respectueuse de l'environnement a émergé et s'est imposée dans le débat public. Comment concilier ces deux aspirations, au-delà des formules imprécatoires. À l'Irig, où les chercheurs travaillent sur les futures générations de mémoires pour les technologies quantiques ou les futurs processeurs pour l'internet des objets, une équipe de recherche s'est posée la question suivante : quel est l'impact environnemental des mémoires qu'elle développe ?

Les chercheurs de l'Irig ont effectué un bilan complet de la soutenabilité des mémoires à aimantation perpendiculaire, une technologie de stockage à basse consommation. Des matériaux critiques au regard de l'approvisionnement comme le cobalt (Co), le ruthénium (Ru), le tantale (Ta) et le platine (Pt) entrent à des degrés divers dans leur composition. En tenant compte de la quantité de matière utilisée par dispositif, c'est le platine, produit à 80 % par l'Afrique du Sud et la Russie, qui présente le plus de risque (géostratégique, environnemental, économique...). Toutefois, selon l'étude publiée par les chercheurs de l'Irig, le coût économique et environnemental d'une mémoire est dominé par le substrat à base de silicium. Une mémoire en contient en effet 127g, contre 3,4mg de Pt.

Il est cependant intéressant, pour amoindrir toute dépendance, de substituer le platine utilisé dans la multicouche Co/Pt par une multicouche Co/Ni dans la couche de référence d'une mémoire magnétique à accès aléatoire (MRAM). Le nickel n'est pas un métal rare et de ce fait ne présente pas de risques dans son approvisionnement. Les résultats des chercheurs (Figure) montrent qu'il est possible de changer la composition de

la couche de référence [Co 0,5 nm/Pt 0,25nm]_N par une couche de composition [Co 0,18nm/Ni 0,55nm]_N tout en conservant les mêmes propriétés magnétiques et la même stabilité thermique. De plus, la substitution du platine par le nickel n'implique pas le recours à d'autres matériaux critiques. Il est alors possible d'obtenir une réduction d'un facteur 3 du potentiel de réchauffement climatique calculée pour de la couche de référence.

Une utilisation plus large des MRAM par l'industrie de la microélectronique est donc envisageable de façon durable en remplaçant le platine par le nickel et de potentiellement diminuer les risques de disponibilité.

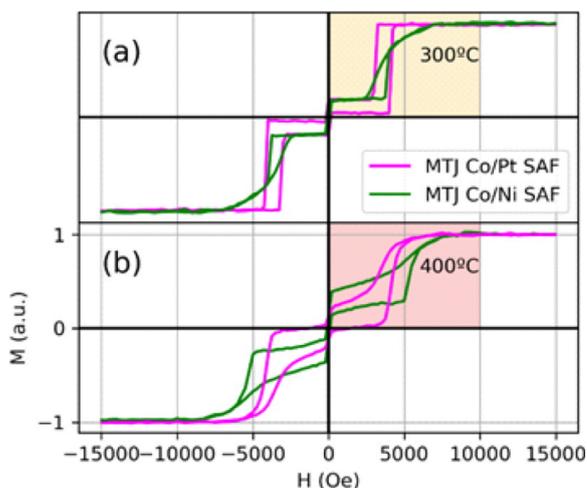
RÉFÉRENCE

A Palomino, J Marty, S Auffret, I Joumard, RC Sousa, IL Prejbeanu, B Ageron and B Dieny. Evaluating critical metals contained in spintronic memory with a particular focus on Pt substitution for improved sustainability. *Sustainable Materials and Technologies*, 2021

Une multicouche est une couche qui est la répétition d'un motif de base. Par exemple [Pt₁Co]_N où N est le nombre de répétitions de Pt₁Co.

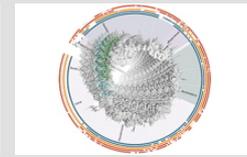
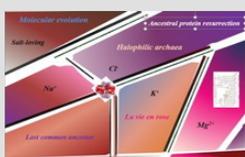
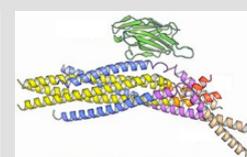
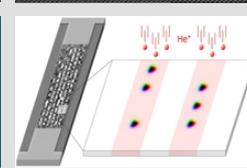
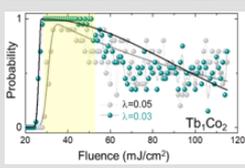
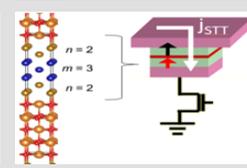
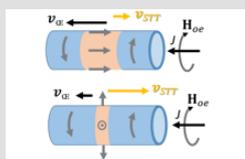
Schématiquement, une mémoire magnétique est constituée de deux couches magnétiques séparées par une couche non magnétique. Une couche magnétique dite **couche de référence** à son aimantation fixe. L'orientation de l'autre couche magnétique est libre. Quand l'aimantation des deux couches est dans la même direction la mémoire est dans l'état « zéro ». Quand l'aimantation de la couche libre est retournée dans la direction opposée alors la mémoire est dans l'état « un ».

Contact : [Ricardo Sousa Spintec](#)
Spintronique et Technologie des Composants

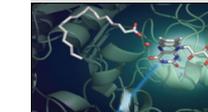


La substitution de la multicouche Co/Pt par une multicouche Co/Ni dans la couche de référence d'une MRAM n'entraîne pas de dégradation de la stabilité thermique.

Autres actualités scientifiques des laboratoires de l'Irig

	<p>L'imagerie sans lentille donne des ailes à la phagothérapie</p> <p>EN SAVOIR PLUS</p>		<p>Un aperçu du processus d'élongation de la paroi bactérienne</p> <p>EN SAVOIR PLUS</p>
	<p>La paléo biochimie, une clé pour comprendre l'apparition des propriétés des enzymes</p> <p>EN SAVOIR PLUS</p>		<p>Une nouvelle conformation de gp41 du VIH-1 comme cible des anticorps neutralisants à large spectre</p> <p>EN SAVOIR PLUS</p>
	<p>Photosynthèse artificielle : une photocathode à base d'éléments peu coûteux et abondants pour la production directe d'H₂ à partir de soleil et d'eau</p> <p>EN SAVOIR PLUS</p>		<p>Dynamique des parois de domaine induite par le courant dans les films ferromagnétiques de Mn₄N dopé au nickel</p> <p>EN SAVOIR PLUS</p>
	<p>Revue - Feuille de route des couples spin-orbite</p> <p>EN SAVOIR PLUS</p>		<p>Les ions hélium mettent les skyrmions sur la piste</p> <p>EN SAVOIR PLUS</p>
	<p>Commutation mono-pulse tout optique de l'aimantation dans une MTJ à base de multicouches de Tb/Co</p> <p>EN SAVOIR PLUS</p>		<p>Amélioration de l'anisotropie magnétique perpendiculaire géante dans une jonction tunnel magnétique à base de MgO en utilisant une couche composite Co/Fe</p> <p>EN SAVOIR PLUS</p>
	<p>Étude théorique du mouvement de la paroi de domaine induit par le courant dans les nanotubes magnétiques à aimantation azimutale</p> <p>EN SAVOIR PLUS</p>		

Communiqués de presse - Prix

<p>Un système de médecine personnalisée alimenté par l'IA pour améliorer les traitements contre le cancer</p>  <p>EN SAVOIR PLUS</p>	<p>Chimie verte et biocarburant : le fonctionnement d'une photoenzyme clef décrypté</p>  <p>EN SAVOIR PLUS</p>	<p>Alpaga : à la recherche des micro-algues des neiges en montagne</p>  <p>EN SAVOIR PLUS</p>
<p>SARS-CoV-2 : un nouveau mode de transmission du virus qui implique les cellules immunitaires</p>  <p>EN SAVOIR PLUS</p>	<p>Marion Gruart - Prix de thèse innovation</p>  <p>EN SAVOIR PLUS</p>	<p>Laurent Blanchoin est élu membre de l'EMBO</p>  <p>EN SAVOIR PLUS</p>

**Biologie et
Biotechnologie
pour la Santé**

UMR_S 1292
CEA/Inserm/UGA
Biosante-lab.fr

**Chimie et
Biologie des
Métaux**

UMR 5249
CEA/CNRS/UGA
www.CBM-lab.fr

**Institut de
Biologie
Structurale**

UMR 5075
CEA/CNRS/UGA
www.IBS.fr

**Modélisation
et Exploration des
Matériaux**

UMR
CEA/UGA
www.MEM-lab.fr

**Photonique
Électronique et
Ingénierie Quantiques**

UMR
CEA/UGA
www.Pheliqs.fr

**Physiologie
Cellulaire &
Végétale**

UMR
CEA/CNRS/UGA/Inrae
www.LPCV.fr

**Département des
Systèmes Basses
Températures**

UMR
CEA/UGA
www.d-SBT.fr

**Spintronique
et Technologie
des Composants**

UMR 8191
CEA/CNRS/UGA/G-INP
www.Spintec.fr

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

UMR 5819
CEA/CNRS/UGA
www.Symmes.fr

irig.cea.fr

**Institut de recherche
interdisciplinaire de
Grenoble**

CEA-Grenoble
17 avenue des Martyrs
38054 Grenoble cedex 9

www.cea.fr/drif/irig/actu/lettres

Responsables :
**Jérôme Garin et
Pascale Bayle-Guillemaud**

Directeur de la publication
Jérôme Garin
Éditeur et format électronique
Pascale Martinez

Comité de rédaction
**Mohamed Atta, Thomas Burger, Alain
Farchi, Giovanni Finazzi, Manuel
Houzet, Matthieu Jamet, Hakima
Mendil-Jakani, Yvain Nicolet, Gilles
Renaud, Ricardo Sousa, Patrick Warin**

