

D'où vient la forme du chou romanesco ?

Le nombre d'or et la **suite de Fibonacci** sont des constantes retrouvées dans beaucoup de domaines, dont certains très éloignés des mathématiques. Ainsi, ils apparaissent dans la nature, au sein de nombreuses formes biologiques ; la ramification des arbres, la disposition des feuilles sur une tige, l'inflorescence d'un artichaut, la disposition des écailles de pommes de pin, ou encore la coquille des escargots. Mais la plante pour laquelle les spirales qui suivent la suite de Fibonacci sont les plus apparentes est sans doute le chou romanesco. Or, comme la majorité des plantes consommées, les choux ont été domestiqués via une sélection artificielle qui a eu pour conséquence de modifier leur apparence, leur taille ou leur territoire de culture. Ils sont les grands champions des changements de forme ; une même espèce a ainsi donné le surprenant chou romanesco (*Photo*) aux formes végétales les plus singulières et dont la formation constituait un mystère.

Le chou romanesco ressemble au brocoli par sa couleur vert pomme et au chou-fleur par sa forme compacte. Ses bourgeons floraux sont disposés en spirales régulières et sa forme géométrique (dite fractale) est très particulière et décorative. Le mystère de sa formation vient d'être résolu par des chercheurs de l'Irig [*collaboration*]. Grâce à des travaux combinant modélisation mathématique et biologie végétale, les scientifiques ont pu déterminer que le chou romanesco, mais aussi le chou-fleur, sont en réalité formés par des bourgeons destinés à devenir des fleurs mais qui n'atteignent jamais leur but. Au lieu de cela, ils se transforment en tiges qui à leur tour tentent de produire des fleurs et ainsi de suite. Le chou naît de cette réaction en chaîne qui provoque un amoncellement de tiges sur des tiges. L'étude a montré que la brève incursion des bourgeons dans un état de fleur affecte profondément leur fonctionnement et leur permet, à la différence des tiges normales, de croître sans feuille et de se multiplier quasiment à l'infini. La forme atypique du chou romanesco s'explique par le fait que ses tiges produisent des bourgeons de plus en plus rapidement (alors que le rythme de production est constant chez le chou-fleur). Cette accélération confère un aspect pyramidal à chacune des fleurettes et fait ainsi apparaître clairement l'aspect fractal de la structure. Cette étude met en lumière comment la sélection de mutations chez les plantes au cours du processus de domestication a modifié parfois de façon drastique leur forme pour donner les fruits et légumes de nos étals.

RÉFÉRENCE

Azpeitia E, Tichtinsky G, Le Masson M, Serrano-Mislata A, Lucas J, Gregis V, Gimenez C, Prunet N, Farcot E, Kater MM, Bradley D, Madueño F, Godin C and Parcy F. Cauliflower fractal forms arise from perturbations of floral gene networks. *Science*, 2021

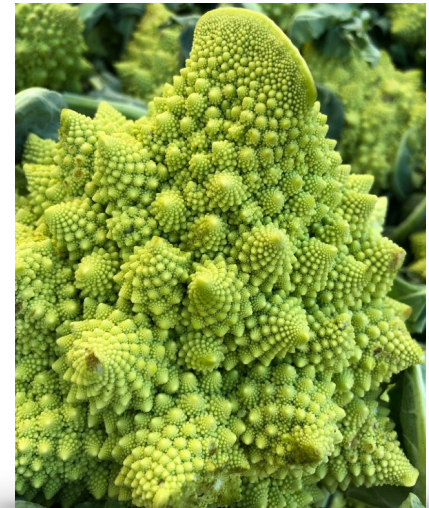


Photo d'un chou romanesco.
© Nathanael Prunet

Contact : [François Parcy](#)
[LPCV](#)
Laboratoire Physiologie Cellulaire &
Végétale

Collaboration. Ont participé des scientifiques du Laboratoire physiologie cellulaire & végétale (CNRS-CEA-INRAE-Université Grenoble Alpes) et du laboratoire reproduction et développement des plantes (CNRS-ENS Lyon-INRAE). Plusieurs universités étrangères sont également impliquées dans l'étude : l'Université polytechnique de Valence, Espagne ; l'Université de Milan, Italie ; l'Université de Californie, États-Unis ; l'Université de Nottingham, Royaume-Uni et l'Université nationale autonome du Mexique.

En mathématiques, **la suite de Fibonacci** est une suite de nombres entiers dont chaque terme successif représente la somme des deux termes précédents, et qui commence par 0 puis 1. Ainsi, les dix premiers termes qui la composent sont 0, 1, 1, 2, 3, 5, 8, 13, 21 et 34. Cette suite à la logique simple est considérée comme le tout premier modèle mathématique en dynamique des populations.

Une toxine bactérienne pilotée par une protéine humaine

Pseudomonas aeruginosa est une **bactérie pathogène opportuniste** responsable d'infections nosocomiales et d'infections mortelles pour les patients atteints de mucoviscidose. Les isolats cliniques sont fréquemment multirésistants aux antibiotiques, ce qui complique la prise en charge des patients infectés. *P. aeruginosa* dispose d'un arsenal de facteurs de virulence, dont le plus actif est un **injectisome** qui injecte des toxines directement dans les cellules cibles. ExoU est la toxine la plus redoutable injectée par ce système. Elle possède une activité nécrosante liée à son activité phospholipase (*Figure*) qui provoque la rupture de la membrane plasmique des cellules, avec pour conséquence des lésions sévères dans les tissus infectés.

Contact : [Philippe Huber](#)
[Biosanté](#)

Laboratoire Biologie et Biotechnologie
pour la Santé
et [IBS](#)

Institut de Biologie Structurale

Pour mettre en œuvre leur activité biologique toxique, les toxines bactériennes détournent souvent à leur profit des molécules ou des mécanismes de la cellule humaine (nommée « cellule hôte ») qu'elles infectent. Des chercheurs de l'IrIg ont recherché, à l'aide d'un crible génétique utilisant la technologie CRISPR-Cas9, les gènes qui pouvaient être impliqués dans la toxicité d'ExoU. En procédant ainsi, un seul gène a été identifié ! Ce gène code pour la protéine humaine DNAJC5, protéine que l'on sait jouer un rôle central dans la sécrétion de certaines protéines cytoplasmiques via un système de transport vésiculaire non-conventionnel (**MAPS**). Les chercheurs ont montré que DNAJC5 guide la toxine vers la membrane plasmique de la cellule hôte, là où ExoU peut exercer son activité toxique (*Figure*). Ce résultat est cohérent avec le fait que la toxine ExoU n'altère pas les cellules qui ne possèdent pas DNAJC5. Les chercheurs ont ainsi montré que des drosophiles dans lesquelles l'expression du **gène l'orthologue** de DNAJC5 était inhibée survivaient beaucoup mieux à l'infection bactérienne.

Le système de transport assuré par la protéine DNAJC5 est donc le talon d'Achille de la toxine ExoU de la bactérie pathogène *Pseudomonas aeruginosa*. Cette découverte pourrait être mise à profit pour empêcher l'action dévastatrice d'ExoU lors d'infections aiguës à *P. aeruginosa*.

Une **bactérie pathogène opportuniste** est capable de provoquer une maladie à la suite d'une diminution des défenses de l'organisme.

L'**injectisome**, ou système de sécrétion de type III (SST3), est un système de virulence présent dans certains pathogènes qui leur permet d'injecter des toxines dans les cellules qu'elles infectent.

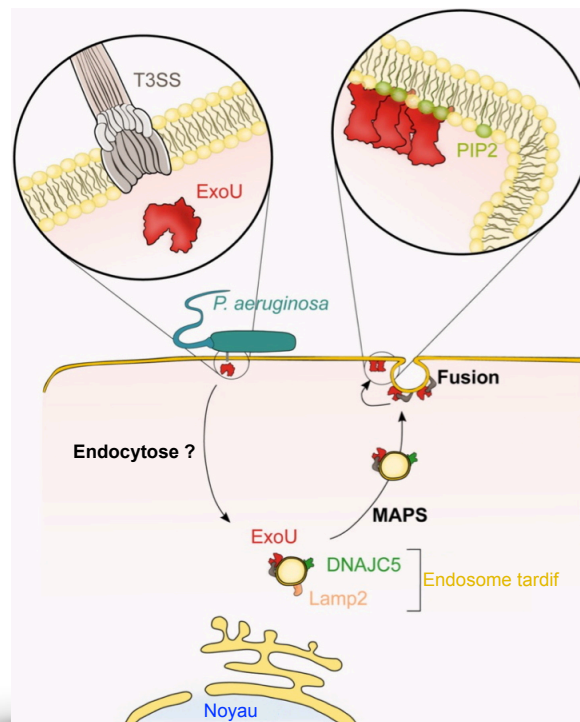
MAPS est un système de sécrétion de protéines cytosoliques incorrectement repliées, découvert récemment.

Le terme **orthologue** décrit des gènes similaires présents chez deux espèces différentes. Ces gènes proviennent d'un même gène ancestral et ont conservé une structure et une fonction identiques au cours de l'évolution.

Un **endosome** est une petite structure sphérique (une vésicule) qui circule dans le cytoplasme.

RÉFÉRENCE

Deruelle V, Bouillot S, Job V, Taillebourg E, Fauvarque MO, Attrée A and Huber P. The bacterial toxin ExoU requires a host trafficking chaperone for transportation and to induce necrosis. [Nature Communications](#), 2021



Trafic vésiculaire d'ExoU dans la cellule infectée.

Après avoir été injectée dans la cellule hôte par l'**injectisome** du système de sécrétion de type III (SST3) de *P. aeruginosa*, ExoU est prise en charge par des **endosomes** tardifs qui sont impliqués dans un système de sécrétion particulier appelé **MAPS**. Ces vésicules sont transportées par ce système jusqu'à la membrane plasmique. ExoU se retrouve ainsi sur la face interne de la membrane plasmique où elle interagit avec le phospholipide PIP2, ce qui modifie sa structure et déclenche son activité phospholipase.

Le talon d'Achille des bactéries pathogènes : le mécanisme de formation de leur paroi

La paroi cellulaire joue un rôle primordial dans la survie des bactéries. Depuis des décennies le mécanisme de formation de son composant central, le peptidoglycane, est exploité en tant que cible des antibiotiques de type beta-lactamine (pénicillines et céphalosporines). Le peptidoglycane forme une structure qui ressemble à un « filet de pêcheur » entourant toute la bactérie. Il est non seulement essentiel à sa stabilité mais aussi au bon déroulement des différentes étapes du cycle cellulaire, comme la division et l'élongation de la paroi du microorganisme. Les protéines qui participent à la machinerie de synthèse de ce filet sont indispensables à la survie bactérienne. Malgré les phénomènes de résistance aux antibiotiques qui sont de plus en plus répandus dans le monde, le processus de formation de la paroi des bactéries reste une cible de choix pour le éventuel développement de nouveaux agents antibactériens.

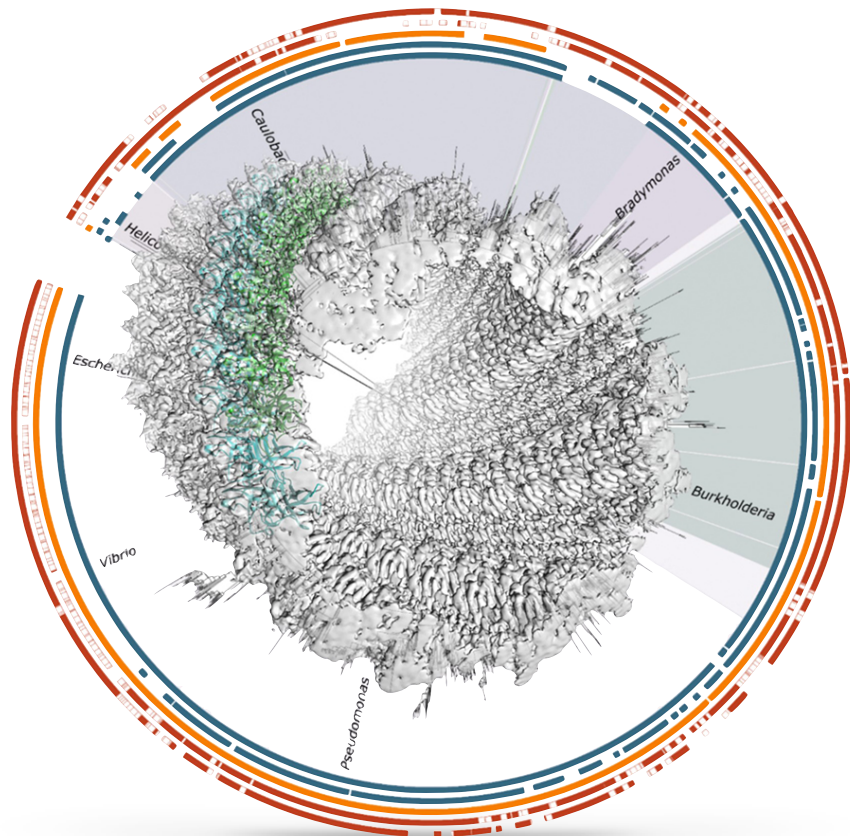
Une des protéines qui joue un rôle central dans la formation de la paroi bactérienne est MreC. Cette protéine est supposée former une plate-forme permettant la stabilisation d'autres protéines qui participent au processus d'élongation de la cellule. Le travail mené par des chercheurs de l'Irig montre comment MreC est capable de s'auto-associer et de s'organiser sous forme de différents polymères comme des filaments et même des tubes. Les scientifiques ont étudié la protéine MreC de trois bactéries pathogènes différentes : *Escherichia coli*, *Acinetobacter baumannii* et *Pseudomonas aeruginosa*. La protéine produite par cette dernière bactérie, un pathogène nosocomial qui cause des infections graves, a été choisie pour réaliser des études structurales. Les structures obtenues à partir d'images de cryo-microscopie électronique (données collectées au microscope Glacios à l'IBS) ainsi que par cristallographie aux rayons X (données à résolution atomique collectées au synchrotron LNLS à Campinas, Brésil), ont révélé des régions clef pour la formation des formes tubulaires de MreC. Toute perturbation de cette forme polymérisée obtenue par exemple par l'introduction de mutations, a impacté non seulement la capacité de MreC à produire des polymères *in vitro*, mais également la production même de MreC dans la cellule bactérienne, un phénomène que les chercheurs ont vérifié par des expériences effectuées directement dans des souches de *P. aeruginosa*.

Les surfaces d'interaction entre les différents éléments constitutifs des polymères de MreC pourraient ainsi représenter une cible pour le développement d'inhibiteurs totalement novateurs, inhibiteurs qui pourraient s'avérer être des candidats pour de futurs antibiotiques.

RÉFÉRENCE

Martins A, Contreras-Martel C, Janet-Maitre M, Miyachiro MM, Estrozi LF, Trindade DM, Malospirito CC, Rodrigues-Costa F, Imbert L, Job V, Schoehn G, Attrée I and Dessen A. Self-association of MreC as a regulatory signal in bacterial cell wall elongation. [Nature Communications](#), 2021

Contact : [Andréa Dessen](#)
IBS
Institut de Biologie Structurale



Superposition de la carte cryo-EM de MreC sur un arbre phylogénétique de variants de MreC présents dans les Protéobactéries.

L'arbre circulaire indique la très haute conservation d'acides aminés montrés comme étant essentiels à la conservation de la structure de MreC. Un des six filaments antiparallèles qui composent le tube de MreC est montré en bleu et vert.

© IBS

Un nouveau procédé enzymatique pour la réduction du CO₂

La quête de la neutralité carbone nécessite le développement de technologies pour la transformation du CO₂ et de ses dérivés en produits de commodité à partir d'énergie bas-carbone. Dans ce contexte, la conception de nouveaux procédés catalytiques efficaces et respectueux de l'environnement pour la réduction du CO₂ est au cœur des préoccupations sociétales. Dans le domaine de la catalyse à des fins de chimie durable, les **biocatalyseurs** présentent l'intérêt d'être hautement sélectifs et efficaces en conditions douces (température et pression ambiantes, solvants aqueux). Cependant, malgré leurs avantages indéniables, le coût de production à grande échelle d'enzymes et leur manque de stabilité limitent encore le développement de telles approches.

Contact : [Christine Cavazza](#)
CBM
Laboratoire Chimie et Biologie des Métaux

Ceci est d'autant plus vrai pour les métalloenzymes rédox complexes, à l'image de la Monoxyde de carbone déshydrogénase (CODH), qui reste à ce jour le catalyseur le plus efficace pour activer des petites molécules comme le CO et le CO₂. La CODH comporte un site actif qui est remarquable en biologie, car composé d'un centre multi-métallique NiFe₄S₄ dont la biosynthèse comporte plusieurs étapes, ce qui nécessite une machinerie multi-protéique spécifique dont le fonctionnement est encore mal connu. Au cours des dernières années, des chercheurs de l'Iríg ont étudié en détails les **protéines chaperons** impliquées dans ce mécanisme. Ces études leur ont permis de mettre au point un système de production hétérologue de la CODH dans lequel le gène de la bactérie carboxydrotrophe *Rhodospirillum rubrum* (capable d'utiliser le CO comme source de carbone et d'énergie) est exprimée dans la bactérie *Escherichia coli*. Ce procédé permet de produire une enzyme aussi stable et active qu'une CODH naturelle en une seule étape de purification. Les chercheurs sont allés plus loin en immobilisant cette CODH recombinante sur des nanotubes de carbone fonctionnalisés [collaboration avec le DCM-BEA de l'UGA Grenoble], ce qui leur a permis de développer un système bio-électro-catalytique stable pendant plusieurs heures pour aboutir à l'inter-conversion de CO₂ en CO (Figure), atteignant des densités de courant de 4,2 mA.cm⁻² pour la réduction du CO₂ et 1,5 mA.cm⁻² pour l'oxydation du CO.

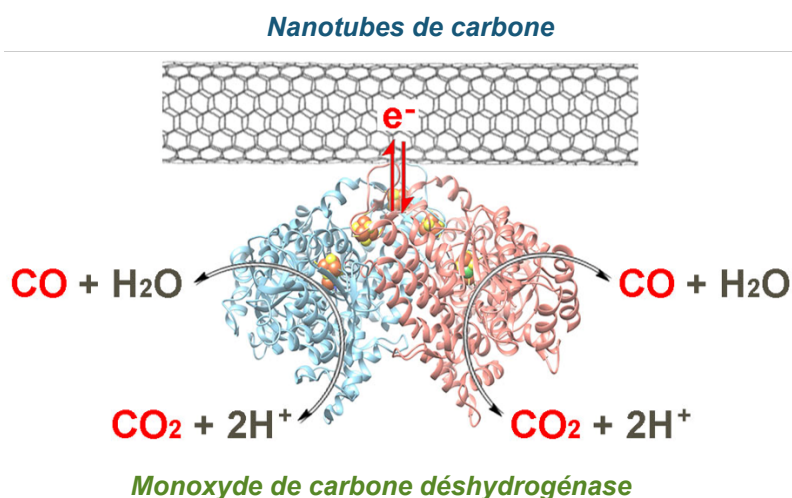
En comparaison avec les procédés électrochimiques de réduction du CO₂ existants à base de catalyseurs moléculaires, ce procédé enzymatique atteint des performances similaires tout en apportant les avantages de fonctionner de façon réversible, en conditions douces et avec de très faibles surtensions. Ces résultats permettent d'envisager leur utilisation aussi bien pour la réduction du CO₂ que pour l'oxydation du CO, dans le cadre de procédés de purification de gaz de synthèse en vue de la production de divers produits chimiques ou carburants.

La **Biocatalyse** est l'utilisation de catalyseurs naturels, comme des enzymes, dans une réaction de synthèse organique.

Une **protéine chaperon** est une protéine dont la fonction est d'assister d'autres protéines dans leur maturation.

RÉFÉRENCE

Contaldo U, Guigliarelli B, Pérard J, Rinaldi C, Le Goff A and Cavazza C. Efficient electrochemical CO₂/CO interconversion by an engineered carbon monoxide dehydrogenase on a gas-diffusion carbon nanotube-based bioelectrode. *ACS Catalysis*, 2021



Inter-conversion de CO₂ en CO catalysée par la Monoxyde de carbone déshydrogénase greffée sur des nanotubes de carbone.
© LCBM

L'optique accélère l'utilisation des phages comme alternative aux antibiotiques

Le nombre croissant d'infections bactériennes résistantes aux antibiotiques (antibiorésistance), conséquence d'un usage trop large des antibiotiques, a été identifié par l'OMS comme une des principales menaces de santé publique à l'horizon 2050. La phagothérapie, basée sur l'utilisation de virus bactériens (bactériophages), suscite dans ce contexte un vif intérêt. Cependant, pour pouvoir être mise en œuvre, elle requiert d'identifier le phage actif sur une bactérie donnée afin de la détruire. Cette évaluation est aujourd'hui basée sur une détection visuelle des plaques de lyse formées par les bactériophages sur des boîtes de Pétri couvertes de bactéries (Figure). Cette inspection visuelle, manuelle et excessivement chronophage (12-24h), limite les possibilités d'application de la phagothérapie auprès du patient.

Une approche originale a été proposée par des chercheurs grenoblois de l'Irig, du Département Technologies pour la Biologie et la Santé, du Laboratoire des technologies de la microélectronique, ainsi que des chercheurs suisses [collaboration réunissant des chercheurs spécialistes de photonique, des biophysiciens et des microbiologistes] pour mettre au point et tester des systèmes optiques afin de vérifier très rapidement l'adéquation phages-bactéries. La stratégie retenue consiste à mettre au point un système d'imagerie sans lentille autour d'un capteur optique de grand format de type CMOS (Figure). La détection des plaques de lyse est alors basée sur l'utilisation d'un algorithme développé en interne, qui permet de reconstruire les images diffractées par les bactéries afin de remonter en temps réel au nombre et à la cinétique des plaques de lyse. Ces mesures renseignent sur la nature et l'efficacité des phages vis à vis des bactéries et permettent de déterminer leur titre, d'étudier leurs morphologies et leurs cinétiques de croissance. Cette nouvelle approche par imagerie sans lentille présente plusieurs avantages. Tout d'abord, en l'absence de lentilles, la résolution et le champ de vision de l'image sont uniquement limités par le pas des pixels et la taille du capteur. Or, les technologies actuelles tirées par le secteur de l'imagerie numérique permettent la réalisation de très grands capteurs avec de très petits pixels (typiquement plusieurs dizaines de millions de pixels sur un capteur de 24 par 36mm). Par conséquent, un champ de vision bien plus large que celui de la microscopie optique conventionnelle est accessible pour le suivi de l'interaction phages-bactéries. De plus, comme le pas des pixels des capteurs actuels est de quelques microns seulement, l'imagerie sans lentille permet de résoudre des structures de quelques dizaines de microns, comme des micro-colonies bactériennes naissantes, et donc de gagner du temps dans le processus d'analyse.

Grâce à cette technique, les chercheurs rapportent avoir déterminé la sensibilité de *Staphylococcus aureus* à différents phage après seulement 3 heures et le titre infectieux après 8 heures et 20 minutes. Ces délais sont bien plus courts que les 12 à 24 heures habituellement nécessaires à l'observation à l'œil nu et au comptage des plaques de lyse. En outre, le suivi continu des échantillons a permis d'étudier la cinétique de croissance des plaques et de confirmer la corrélation entre la densité bactérienne et la diffusion des phages dans la couche de d'agar. Enfin, grâce à la résolution de 4,3 µm (Figure), les chercheurs ont été en mesure de détecter des micro-colonies bactériennes de *Klebsiella pneumoniae* résistantes aux phages à l'intérieur des limites des plaques de lyse, montrant ainsi que leur prototype est également un dispositif approprié pour le suivi de la résistance aux phages.

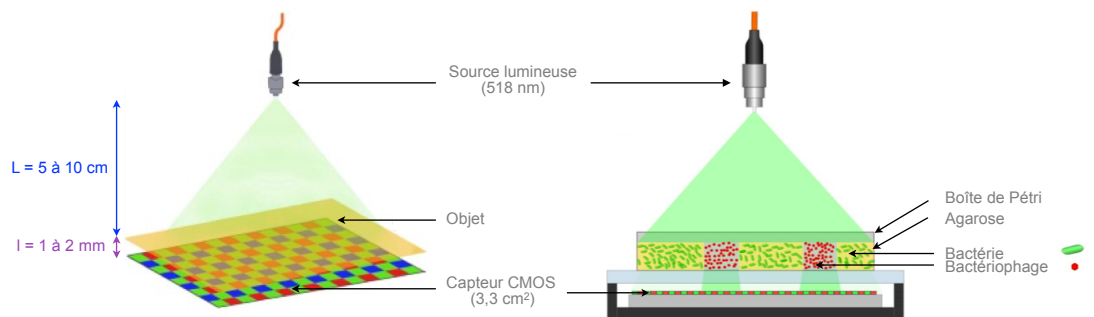
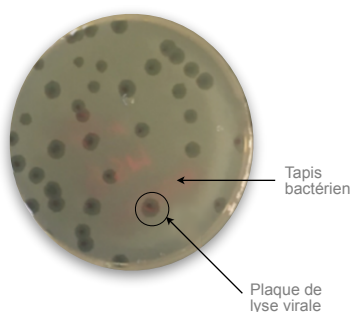
Cette première preuve de concept d'un système d'imagerie sans lentille, mis en œuvre sous la forme d'un dispositif compact et économique, ouvre une voie prometteuse à la phagothérapie. Plusieurs programmes démarrent au plan national et international pour en valider les applications. Des travaux futurs porteront également sur le développement d'algorithmes plus fins permettant la classification morphologique des plaques (et donc des phages) en fonction de leur taux de croissance mais aussi de leur morphotype.

Contacts : [Emmanuel Picard](#)
et [Emmanuel Hadji](#)
[Pheliqs](#)
Photonique Électronique et Ingénierie
Quantiques

RÉFÉRENCE

Perlemon P, Marcoux PR, Picard E, Hadji E, Zelsmann M, Mugnier G, Marchet A, Resch G, O'Connell L and Lacot E. Phage susceptibility testing and infectious titer determination through wide-field lensless monitoring of phage plaque growth. *PLoS One*, 2021

Collaboration : Laboratoire Photonique Électronique et Ingénierie Quantiques (Irig, CEA-Grenoble, France) ; Laboratoire des Systèmes d'Imagerie pour le Vivant (Leti-DTBS, CEA-Grenoble, France) ; Laboratoire des technologies de la microélectronique (CNRS, France) ; laboratoire de bactériophages et de phagothérapie (Centre hospitalier universitaire vaudois, Suisse).



Plaque de lyse.

Pour tester la sensibilité d'une bactérie à un bactériophage, les deux organismes sont co-cultivés à la surface d'une boîte de Pétri recouverte de gélose où un tapis bactérien se forme. Si la bactérie est sensible au bactériophage, celle-ci est détruite (c'est la lyse à proprement parler) et une plage de lyse se forme à la surface de la gélose, au fur et à mesure que la lyse progresse.

© Pheliqs

Prototype personnalisé sans lentille.

L'appareil est composé d'un système de détection et d'un module d'illumination. Le système de détection est constitué d'un capteur CMOS (Complementary Metal Oxide Semiconductor) de 22,3 × 14,9 mm² de type APS-C (Advanced Photo System type-C), issu d'un appareil photo numérique « grand public ». Le capteur est constitué d'une matrice de 5344 × 3516 pixels d'un pas de 4,3 µm. La boîte de Pétri sur laquelle se trouvent les bactériophages est placée directement sur le capteur et éclairée par le haut par une LED verte monochromatique (518 nm) couplée à une fibre optique multimode de 200 µm de diamètre (Thorlabs M72L02). Les images sont acquises directement et converties en fichiers .tiff. Elles sont ensuite traitées à l'aide de deux algorithmes différents ; le premier traite toute la zone de l'image pour détecter les plaques, tandis que le second ne traite qu'une sous-image recadrée de chaque plaque pour calculer le taux de croissance.

© Pheliqs

Contrôler la croissance du graphène sur cuivre liquide

La synthèse de matériaux bidimensionnels de grande taille et sans défaut constitue un défi majeur pour les applications industrielles (photovoltaïque, semi-conducteurs etc.). L'état de l'art pour le graphène consiste à réaliser le dépôt sur du cuivre solide par un procédé de **croissance chimique en phase vapeur (CVD)** à des températures supérieures à 1000°C. Mais le cuivre polycristallin génère des défauts dans la couche de graphène, et après refroidissement la couche forme des « rides » et des domaines qui dégradent notablement sa qualité. Les chercheurs travaillent sur le développement d'un nouveau procédé de synthèse CVD utilisant des catalyseurs métalliques à l'état liquide.

Un nouveau procédé permet d'élaborer du graphène exempt de défaut, et de taille compatible avec le développement de dispositifs. Cette croissance par voie chimique est opérée dans des conditions de températures (~1100°C) et de pressions (~0,1 à 1 atm) comparables à celles utilisant des catalyseurs solides. Jusqu'alors, l'élaboration se faisait en aveugle. Elle n'était optimisée que de façon empirique faute d'observation durant la croissance du fait de la présence de gaz réactifs à haute température et pression atmosphérique, et de l'état liquide du substrat.

Les chercheurs de l'Irigr [**collaboration**] ont mis au point des instruments de caractérisation utilisés *in situ*, *operando*, permettant de contrôler et de guider en temps réel la formation des cristaux de graphène. Quatre méthodes complémentaires (**Figure 1**) ont été appliquées *in situ* en temps réel : la diffraction des rayons X synchrotron, leur réflectivité, la spectroscopie Raman et la microscopie optique en mode rayonnement (**Figure 2**). Les rayons X synchrotron confirment la cristallinité supérieure du graphène en une monocouche. Le suivi en temps réel permet de maîtriser la taille, la forme et la pureté des cristaux et d'optimiser la vitesse de croissance. Enfin, les observations expérimentales associées à une modélisation ont permis de comprendre les mécanismes de la croissance. La morphologie de la couche de graphène est ainsi contrôlée et comprise à toutes les échelles, de l'atome jusqu'au millimètre.

Le procédé mis au point ouvre la voie à la production rapide de graphène monocristallin exempt de défaut sur des surfaces de plusieurs centimètres carrés (**Figure 3**), donc adapté à différentes applications électroniques. Cette méthodologie de suivi et de contrôle en temps réel peut également être appliquée pour la caractérisation fine d'autres matériaux 2D.

Le **dépôt chimique en phase vapeur (CVD)** est un procédé d'élaboration de matériaux à partir de précurseurs gazeux. Dans une enceinte sous vide, le substrat est exposé à des gaz qui réagissent et/ou se décomposent à la surface du substrat pour générer le dépôt.

Operando : étude du procédé en cours et dans les conditions réelles.

Collaboration : ESRF-The European Synchrotron, France ; Université de Patras, Grèce ; Université de technologie de Munich, Allemagne ; Université de Leiden et Leiden Probe Microscopy (LPM), Hollande

RÉFÉRENCE

Jankowski M, Saedi M, La Porta F, Manikas AC, Tsakonas C, Cingolani JS, Andersen M, de Voogd M, van Baarle GJC, Reuter K, Galiotis C, Renaud G, Konovalov OV and Groot IMN. Real-time multiscale monitoring and tailoring of graphene growth on liquid copper. *ACS Nano*, 2021

Contact : [Gilles Renaud](#)
[MEM](#)
Modélisation et Exploration des
Matériaux

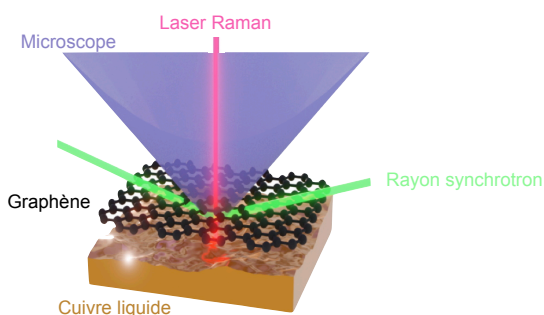


Figure 1 : Représentation des quatre techniques couplées *in situ*, *operando* et en temps réel, pour le contrôle de la croissance de graphène de grande qualité et en grande taille.
© Francesco La Porta

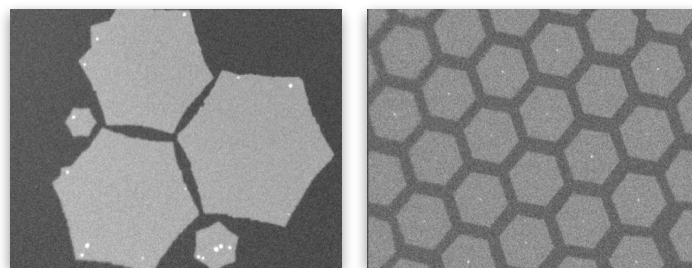


Figure 2 : Flocons de graphène vus par microscopie en mode radiatif durant leur croissance sur métal liquide (Echelle des images : ~1 mm).
© MEM

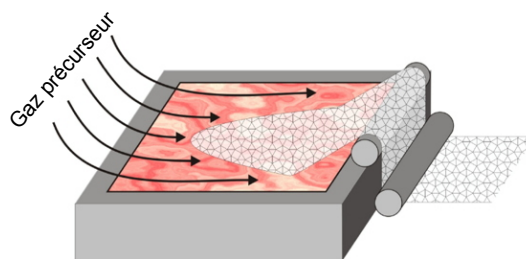


Figure 3 : Représentation schématisée de la production en continu de matériaux 2D par croissance sur des métaux catalyseurs liquides.
© MEM

Des neutrons pour un voyage fantastique au cœur des piles

Face au changement climatique et à la pollution qui pèsent de plus en plus sur l'environnement, les chercheurs s'efforcent de développer des solutions énergétiques durables qui réduiront notre dépendance aux combustibles fossiles. Parmi les technologies pour stocker et libérer une énergie électrique plus propre, se distinguent les études sur les batteries, les piles à combustible et les électrolyseurs. Voici comment la diffusion des neutrons se développe pour devenir un outil puissant dans la mise au point de ces dispositifs.

Les piles à combustible et les électrolyseurs ont plusieurs composants en commun, notamment une membrane polymère semi-perméable qui agit comme une paroi séparatrice empêchant les réactions chimiques secondaires indésirables et les courts-circuits. Cette membrane polymère, qui remplit aussi le rôle d'électrolyte conduisant sélectivement les ions, constitue un élément clé pour une nouvelle génération de batterie dit de type «tout-solide». Elle fait donc l'objet de recherches visant à résoudre les problèmes critiques qui lui sont inhérents tels que sa durabilité, sa performance et son coût de production. Dans ce but, les chercheurs de l'Irig [collaboration] exploitent les techniques neutroniques, telles que la réflectivité neutronique, la diffusion inélastique et quasiélastique, la diffusion aux petits et grands angles, pour mieux comprendre les structures complexes et les mécanismes de transport des ions dans la membrane. L'amélioration des connaissances qui découlent de ces études a pour but de concevoir des formulations nouvelles aux propriétés améliorées.

Le flux de neutrons est une sonde efficace pour caractériser la structure et la dynamique de la membrane polymère sur une gamme très étendue d'échelles de longueur et de temps. Les neutrons étant particulièrement adaptés pour traverser les parois des conteneurs métalliques et céramiques sans les détériorer, ils permettent d'étudier les membranes dans les conditions réelles de fonctionnement des cellules électrochimiques. Dans les piles à combustible, grâce à la sensibilité des neutrons, il est possible de repérer les

déplacements des atomes hydrogène au sein de la membrane. Les expériences de contraste isotopique permettent aussi de séparer et d'identifier les processus complexes qui se produisent au cœur de la membrane.

Bien que la complexité intrinsèque des membranes représente un défi pour la prédiction et l'optimisation de leurs fonctions, les techniques de diffusion des neutrons permettent d'étudier la structure et la dynamique de la membrane en fonction de l'hydratation, et notamment de contrôler tout changement dans les conditions opérationnelles réelles qui influencent directement les performances. Par exemple pour les piles à combustible, si la teneur en eau dans la membrane est trop faible, le transport des ions est freiné. À l'opposé, un excès d'eau fait gonfler la membrane, ce qui dégrade sa stabilité et ses performances.

Grâce à de nouveaux instruments comme les sources de neutrons plus brillantes et des expériences innovantes en mode *operando* c'est-à-dire pendant le fonctionnement réel du système électrochimique, la diffusion des neutrons est en voie de devenir un outil de recherche majeur pour le développement de dispositifs de production et de stockage d'énergie propre.

RÉFÉRENCE

Foglia F, Lyonnard S, Sakai VG, Berrod Q, Zanotti JM, Gebel G, Clancy AJ and McMillan PF. Progress in neutron techniques: Towards improved polymer electrolyte membranes for energy devices. *Journal of Physics: Condensed Matter*, 2021

Contact : [Sandrine Lyonnard](#)
[SyMMES](#)

Système Moléculaires et nanoMatériaux
pour l'Énergie et la Santé

Collaboration : Département de chimie, University College London, Royaume-Uni
ISIS Neutron and Muon Source, Royaume-Uni
Laboratoire Léon Brillouin (CEA-CNRS), Université Paris-Saclay, France
CEA-Liten (CEA-UGA), France

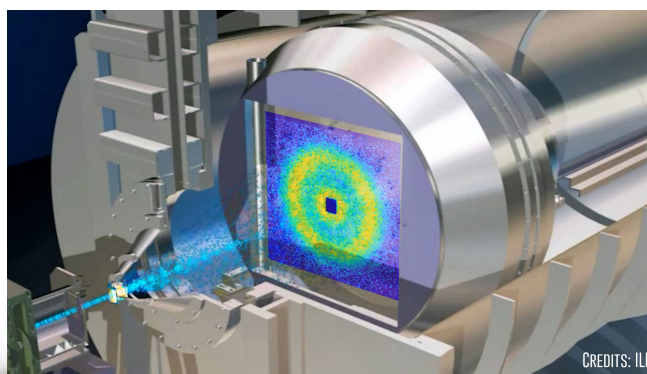


Illustration du flux de neutrons traversant une pile à combustible pour obtenir une image de diffusion par détection SANS, instrument D22 à l'ILL.
Illustration extraite de la [vidéo](#) « Neutrons an inevitable tool for your research on fuel cell ». © ILL

Effet de l'irradiation par des ions très massifs sur des MRAM de dernière génération

L'environnement spatial soumet les systèmes électroniques à rude épreuve où ils subissent de fortes variations de température, et surtout un bombardement incessant de particules très énergétiques. Ces particules peuvent créer des dégâts considérables dans les composants microélectroniques comme les mémoires à semi-conducteurs et altérer les données de façon catastrophique. Les mémoires magnétiques à accès aléatoires (MRAM pour *Magnetic Random Access Memory*) sont connues pour être quasiment insensibles aux bombardements fortement énergétiques. Il s'agit néanmoins d'un type de MRAM très encombrant dont il est difficile de réduire les dimensions. À l'Irig, des physiciens travaillent sur des MRAM dont les dimensions peuvent être aisément réduites et qui pourraient de ce fait constituer des candidats intéressants pour remplacer les mémoires utilisées actuellement par l'industrie spatiale.

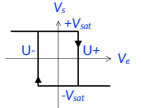
Contact : [Gregory Di Pendina](#)
Spintec
Spintronique et Technologie des
Composants

Les mémoires les plus courantes fonctionnent par piégeage et dépiégeage de charges électriques. Dans l'espace (satellites géostationnaires, missions spatiales lointaines...) ces composants sont soumis à un bombardement intense de particules ayant des énergies très importantes (électrons, protons, rayons gamma,...). Certaines de ces particules, souvent les plus énergétiques, peuvent traverser les dispositifs de blindage et venir endommager les mémoires ou perturber leur fonctionnement. En effet, une particule fortement énergétique est capable de « dépiéger » une charge, ou au contraire d'en créer une, ce qui a pour effet de modifier l'information de façon ponctuelle ou définitive.

Les MRAM stockent l'information en utilisant l'orientation relative des aimantations magnétiques de deux couches magnétiques. En l'absence de charge, les mémoires MRAM ne sont pas susceptibles à ce type de phénomène. Les chercheurs de l'Irig étudient différents types de MRAM. Ils ont étudié la tenue aux irradiations de Jonctions Tunnel Magnétiques (JTM) de mémoires pouvant servir à des mémoires MRAM à forte densité (d'au moins 1 Go), qui mettent en jeu les processus de fabrications les plus récents qu'ils ont développés. Les expériences d'irradiations ont été effectuées au Cyclotron de l'Université Catholique de Louvain (UCL). L'irradiation des mémoires avec des ions lourds $^{124}\text{Xe}^{35+}$ de 995 MeV (les ions les plus énergétiques disponibles à Louvain, représentatifs de l'énergie des particules pouvant impacter les circuits) montre une sensibilité insignifiante des JTM face à ces particules et aucune modification de leurs propriétés électriques. Par ailleurs, les chercheurs ont observé que les propriétés de

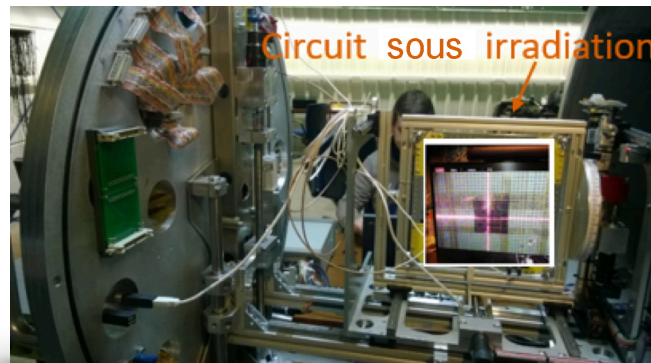
magnétorésistance étaient légèrement améliorées après irradiations. En revanche, des modifications de certaines propriétés magnétiques peuvent être observées, notamment la réduction du champ coercitif et un décalage du cycle *hystérésis*. Ces derniers changements pourraient conduire à une dégradation de l'utilisation de la mémoire, notamment en termes de stabilité. Les causes de ces dégradations semblent être la conséquence d'un effet de chauffage induit par l'irradiation (énergie déposée par les particules).

L'*hystérésis* (ou hystérèse), est la propriété d'un système dont l'évolution ne suit pas le même chemin selon qu'une cause extérieure augmente ou diminue.



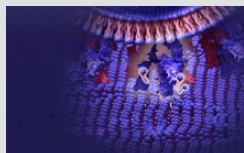
RÉFÉRENCE

O Coi, G Di Pendina, R Sousa, N Adrianjohany, D Dangla, R Ecoffet and L Torres. Heavy-ion irradiation effects on advanced perpendicular anisotropy spin-transfer torque magnetic tunnel junction. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 2021



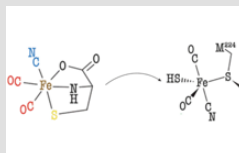
Chambre d'irradiation au cyclotron de Louvain. L'image insérée montre le faisceau d'ions (croix violette) sur le circuit au cours de l'irradiation.

Autres actualités scientifiques des laboratoires de l'Irig



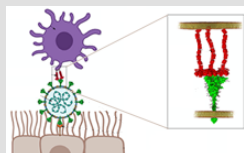
Interactions de la protéine Spike du SARS-CoV-2 avec des bicouches lipidiques modèles

[EN SAVOIR PLUS](#)



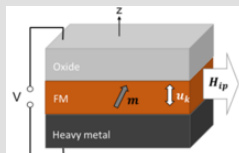
De la chimie radicalaire pour l'assemblage du site actif des hydrogénases à [FeFe]

[EN SAVOIR PLUS](#)



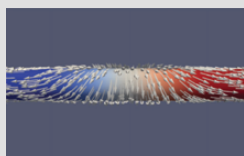
SARS-CoV-2 : un mécanisme de transmission inédit

[EN SAVOIR PLUS](#)



Vers un renversement efficace de l'aimantation grâce au contrôle de la tension de l'anisotropie magnétique

[EN SAVOIR PLUS](#)



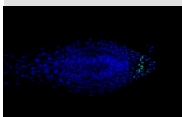
Imagerie magnétique à résolution temporelle des effets de champ d'Ersted dans les nanofils cylindriques

[EN SAVOIR PLUS](#)



Communiqués de presse - Prix

Visualisation en live de la transcription des gènes de toutes les cellules d'une plante



[EN SAVOIR PLUS](#)

D'où vient la forme du chou romanesco ?



[EN SAVOIR PLUS](#)



**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 1417
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/drf/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
Catherine Cavazza, Andréa Dessen,
Alain Farchi, Emmanuel Hadji, Philippe
Huber, Sandrine Lyonnard, François
Parcy, Gregory Di Pendina, Emmanuel
Picard, Gilles Renaud, Patrick Warin

