

Prix et distinctions

De nouveaux membres élus à l'Académie des sciences

L'Académie des sciences vient d'élire dix-huit nouveaux membres, parmi lesquels (section Chimie) :

- **Olivier Donard**, directeur de recherche émérite au CNRS, directeur du centre MARSS (Centre de spectrométrie de masse pour les sciences de la réactivité et de spéciation), Hélioparc (Pau) ;

- **Philippe Walter**, directeur de recherche au CNRS, directeur du Laboratoire d'archéologie moléculaire et structurale (LAMS, Sorbonne Université).

La cérémonie de réception des nouveaux élus aura lieu mardi 6 juin 2023, sous la coupole de l'Institut de France.

• Source : Académie des sciences, 19/12/2022.

Recherche et développement

La France à la pointe sur les techniques analytiques



Le nouveau spectromètre RMN 1 200 MHz installé à Lille. © Alexandre CAFFIAUX - Université de Lille.

Un spectromètre de nouvelle génération a été inauguré tout début janvier à Lille, ouvrant la voie à des découvertes importantes en chimie, physique, sciences des matériaux et biologie. Grâce à un champ magnétique plus puissant que ses prédécesseurs, ce nouveau spectromètre offrira une meilleure sensibilité et une meilleure résolution, pour des échantillons aussi bien liquides que solides. Il est l'un des trois premiers outils de ce type au monde permettant la caractérisation des matériaux inorganiques et hybrides ; il permettra de sonder la composition chimique de matériaux variés ou de protéines complexes de manière plus fine, plus rapidement – utile pour les systèmes peu stables –, ou avec des échantillons plus petits ou moins concentrés.

Ses cibles seront par exemple des catalyseurs développés pour transformer le dioxyde de carbone en matériaux à haute valeur ajoutée (plastiques biodégradables) et qui contiennent des éléments chimiques aujourd'hui difficilement observables par RMN. Il s'agira aussi de matériaux innovants utilisés dans les domaines de l'énergie (batteries entièrement solides, panneaux solaires, etc.), de la santé, de l'agroalimentaire ou de

Prix Jeunes pour l'Environnement EpE-TF1/LCI

Le prix Jeunes pour l'Environnement donne l'occasion aux étudiants, jeunes diplômés ou actifs de moins de 30 ans d'apporter leur réponse concrète à un aspect de la transition écologique. Cette année, le thème porte sur l'adaptation au changement climatique. Visant à limiter les impacts du changement climatique et les dommages associés, l'adaptation doit être sobre et durable afin de répondre aux enjeux climat, ressources et biodiversité. Entre l'autonomie ou la transformation d'un système, les recommandations des parties prenantes sont nombreuses et diversifiées. Quelles sont les solutions les plus efficaces, et les plus sobres ?

Les candidats sélectionnés présenteront leur projet devant un jury composé d'experts et de partenaires aux profils variés (journalistes, représentants d'entreprises, professeurs, anciens lauréats). Les auditions et la cérémonie de remise des prix sont publiques et auront lieu le 22 juin 2023 (date prévisionnelle).

Date limite de réception des dossiers : 20 mars 2023.

• www.epe-asso.org/prix-epe-lci-2023

la cosmétique. Côté biomolécules, le spectromètre permettra d'observer en détail des protéines impliquées dans le traitement de la maladie d'Alzheimer et de maladies infectieuses, ou encore de suivre plus précisément les interactions entre protéines, ARN et petites molécules, notamment à visée thérapeutique.

Pour arriver à un tel niveau de résolution et de sensibilité, il fallait dépasser une limite technologique. Les aimants supraconducteurs à basse température ne fonctionnent en effet que pour des fréquences pour les protons inférieures ou égales à 1 GHz. Pour aller au-delà, il a fallu combiner ces premiers aimants avec des bobines supraconductrices à haute température, contenant des kilomètres de rubans en céramique. Ce nouveau type d'aimant RMN hybride produit

À propos du cannabidiol (CBD)

L'Académie de médecine communique

Dans le chanvre (*Cannabis sativa*) sont présents de nombreux cannabinoïdes dérivés d'un même précurseur, le cannabigérol (CBG). Des enzymes spécifiques convertissent le CBG en d'autres molécules, dont les plus connues sont le tétrahydrocannabinol (THC), psychotrope addictif majeur du cannabis, et le cannabidiol (CBD), non addictif mais dont les effets indésirables méritent d'être mieux connus.

Le CBD, substance active d'origine le plus souvent naturelle, fait partie des phyto-cannabinoïdes. Il est présent dans la fleur de cannabis séchée et des produits de composition complexe qui, pour pouvoir être commercialisés, doivent être, conformément à la réglementation, pauvres (< 0,3 %) en THC (substance la plus psychoactive du cannabis). De nombreux produits contenant du CBD sont ainsi commercialisés : huiles, produits cosmétiques, produits alimentaires (boissons alcoolisées ou non, sucreries, tisanes), et produits à usage vétérinaire [1].

Contrairement au THC, le CBD ne relève pas de la réglementation des stupéfiants, ni de celle des psychotropes. Cependant, l'arrêté du 30 décembre 2021 indique que les produits contenant du CBD ne peuvent, sous peine de sanctions pénales, revendiquer des allégations thérapeutiques, à moins qu'ils n'aient été autorisés comme médicament⁽¹⁾. Au regard de la réglementation européenne sur les nouveaux aliments, l'Autorité européenne de sécurité des aliments (EFSA) a suspendu l'évaluation du CBD dans l'attente de données complémentaires sur la sécurité d'emploi.

Dans le corps humain, le CBD se lie à plusieurs dizaines de récepteurs différents, notamment ceux de la sérotonine et de la dopamine, et à des acides aminés excitateurs et inhibiteurs. Les données constatées *in vitro* (cultures cellulaires) et chez l'animal ne sont pas extrapolables à l'espèce humaine en termes d'effets cliniques, thérapeutiques ou indésirables. En dehors d'une utilisation en thérapeutique adjuvante [2] à dose élevée dans des épilepsies pharmaco-résistantes, les preuves scientifiques d'un intérêt thérapeutique de l'usage du CBD seul manquent.

Souvent présenté sous la dénomination de « cannabis light », « cannabis légal » ou « cannabis bien-être », le CBD est revendiqué comme favorisant le « bien-être », les usagers rapportant des finalités d'usage pour soulager l'anxiété, le stress ou la douleur, améliorer le sommeil, voire aider au sevrage en cannabis (riche en THC) [3]. Il est alors difficile de faire la part d'un effet propre de la substance (pharmacologique) et d'un effet placebo.

Le CBD peut induire des effets indésirables (troubles digestifs, toxicité hépatique, somnolence, fatigue), dont la fréquence augmente avec la dose par prise et la dose quotidienne. Il existe aussi un risque d'interaction avec de nombreux médicaments, d'autant plus élevé que la dose de CBD consommée est élevée. Une augmentation des concentrations sanguines de certains de ces médicaments, donc de leurs effets indésirables, peut en résulter.

Le CBD n'étant pas une substance classée parmi les stupéfiants, son usage associé à la conduite d'un véhicule n'est pas interdit. Toutefois, les produits contenant du CBD contiennent toujours du THC, mais en quantité variable, ce dont le consommateur n'est pas forcément clairement informé. Selon la concentration en THC, la quantité et la fréquence d'usage du produit contenant du CBD, il est donc possible que le prélèvement d'un utilisateur de CBD soit testé positif pour le THC, lors du sport ou dans le cadre de la sécurité routière.

Dans le sport, les bénéfices du CBD, notamment lors des phases de récupération, ne sont pas bien établis, et il ne faut pas méconnaître ses effets indésirables potentiels tels qu'une baisse de la vigilance ou des troubles digestifs, qui peuvent s'avérer incompatibles avec des performances sportives. Le CBD ne fait pas partie des substances dopantes. Néanmoins, son usage associé à des pratiques sportives peut conduire, comme déjà évoqué, à un test positif pour le THC [4].

L'Académie nationale de médecine appelle l'attention sur les risques liés à l'usage du CBD et propose que :

- les informations sur les emballages des produits non pharmaceutiques contenant du CBD soient améliorées : risque d'interactions médicamenteuses ; procédure pour déclarer un effet indésirable ; risques associés à la conduite automobile ; risque de test positif au THC dans le cadre de la sécurité routière ou du sport ;
- les usagers soient informés sur la dose en milligrammes de CBD consommée par prise, et que, si elle dépasse 50 mg/jour, cette prise soit précédée, en cas de traitement médicamenteux en cours, par la recherche préalable, avec un professionnel de santé (médecin, pharmacien), de possibles interactions médicamenteuses, et ne conduise pas à un arrêt du traitement médicamenteux ;
- compte tenu de la diversité des produits contenant du CBD, la réglementation et les conditions d'accès à ces produits soient harmonisées, afin que les usagers disposent d'une information, voire d'un accompagnement adapté, en cas d'usage de ces produits ;
- enfin, que des travaux de recherche explorent l'hypothèse que la consommation de CBD fumé puisse constituer une incitation comportementale à l'usage de la cigarette (de tabac ou de cannabis).

• Source : Académie de médecine, 08/12/2022.

⁽¹⁾ C'est le cas, notamment, pour un médicament contenant exclusivement du cannabidiol purifié, l'Epidyolex, autorisé en France pour certaines formes d'épilepsies pharmaco-résistantes, et qui relève de la réglementation des substances vénéneuses.

[1] N. Authier, *Le Petit Livre du CBD*, First Editions, 2022, p. 49-55.

[2] J.C. Alvarez *et al.*, Le cannabidiol (CBD) : que faut-il retenir ?, *Tox. Anal. Clin.*, 2022, 34, p. 211-214.

[3] N. Authier N. *Le Petit Livre du CBD*, *Op cit.*, p. 64-65.

[4] U. Marek *et al.*, Preliminary data on the potential of unintentional antidoping rule violations by permitted cannabidiol (CBD) use, *Drug Test Anal.*, 2021, 13, p. 539-549.

ainsi un champ magnétique de 28 teslas – environ 600 000 fois plus intense que le champ magnétique terrestre en France – avec une fréquence de 1,2 GHz pour les protons.

Le spectromètre à 1,2 GHz de Lille sera le premier en France et le septième au monde, les six précédents ayant été installés en Europe depuis 2020. Suite à la réussite de ces opérations en Europe, plusieurs laboratoires américains et asiatiques cherchent maintenant à acquérir ce type d'appareillage mis en place par l'entreprise Bruker.

Le projet, qui aura nécessité dix ans de travail, aura coûté environ 15 millions d'euros, dont 2,5 M€ pour le bâtiment qui accueille le spectromètre sur le campus de la cité scientifique à Villeneuve d'Ascq. Le financement a fait appel à de nombreux partenaires : l'Europe, l'État, la Région Hauts-de-France, le département du Nord, la métropole européenne de Lille, le CNRS et l'Université de Lille.

Le bâtiment a lui-même été un défi : pour assurer une performance optimale de l'outil, la température ne doit pas varier de plus de 0,5 °C sur 24 heures, l'hygrométrie doit être maîtrisée et les vibrations sont amorties par une dalle en béton sans acier (qui perturberait l'aimant) d'une épaisseur de 1,5 mètre. L'installation de l'aimant, qui mesure plus de quatre mètres de haut et deux mètres de large et pèse presque 10 tonnes, a nécessité plus de 4 000 litres d'hélium liquide pour le refroidir. Un système de récupération de l'hélium, ressource non renouvelable, a été mis en place pour limiter l'impact environnemental.

L'accueil de ce nouveau spectromètre s'est fait dans le cadre d'Infranalytics, infrastructure nationale née en 2020 de la fusion de trois infrastructures de recherche proposant des techniques analytiques de pointe en chimie, Infranalytics compte aujourd'hui 23 équipements sur treize sites en France et accueille environ 200 projets par an d'universitaires français et étrangers, voire d'industriels. Avec ses domaines d'applications variés, le spectromètre à 1,2 GHz viendra remplacer un spectromètre moins puissant qui était également à Lille.

Au-delà de ce nouveau spectromètre RMN, l'infrastructure de recherche Infranalytics vise à développer les deux autres techniques qu'elle héberge : la spectrométrie de masse à transformée de Fourier (FT-ICR) et la résonance paramagnétique électronique (RPE), cousine de la RMN. Pour la première, un spectromètre montant à 18 teslas – le plus haut champ en Europe – sera livré en 2024 à Rouen, représentant un saut technologique et permettant un gain important en sensibilité et résolution. Pour la seconde, un nouvel appareil devrait être bientôt commandé pour le Laboratoire de spectroscopie pour les interactions, la réactivité et l'environnement (LASIRE, CNRS/Université de Lille).

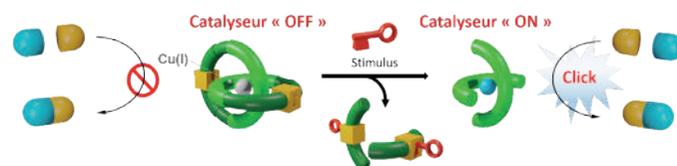
• Source : CNRS, 04/01/2023.

Des catalyseurs OFF/ON à base de caténanes

Inspirés par les travaux pionniers de Jean-Pierre Sauvage, prix Nobel de chimie en 2016, des chimistes ont conçu des catalyseurs originaux activables « à la demande ».

Les molécules entrelacées, telles que les rotaxanes ou les caténanes, présentent des propriétés particulières qui découlent de la présence au sein de leur structure d'une ou plusieurs liaisons mécaniques. Un rotaxane est une molécule constituée d'un anneau – une grande molécule cyclique appelée macrocycle – lié mécaniquement à une molécule linéaire qui le traverse de part en part et autour de laquelle il peut tourner, tandis qu'un caténane est formé d'au moins deux anneaux

imbriqués l'un dans l'autre comme les maillons d'une chaîne. Depuis leur découverte, ces molécules uniques qui peuvent agir comme de véritables moteurs moléculaires ont rapidement trouvé des applications dans des domaines aussi variés que l'énergie, la médecine, les matériaux, la catalyse, etc.



Mécanisme d'activation des catalyseurs OFF/ON à base de caténanes auto-immolables. © S. Papot.

Des chimistes de l'Institut de chimie des milieux et matériaux de Poitiers (CNRS/Université de Poitiers) ont récemment étudié la possibilité d'utiliser les propriétés des caténanes pour concevoir des catalyseurs originaux à base de cuivre activables « à la demande ». Les molécules étudiées sont constituées d'un ion cuivreux (Cu^+) encapsulé au sein de deux macrocycles associés entre eux par une liaison mécanique. Ainsi « emprisonné » dans la cavité formée par les deux anneaux entrelacés, le Cu^+ ne peut pas catalyser la réaction pour laquelle il était prévu, ici une réaction de chimie click*. Dans cette configuration, le catalyseur est donc en mode OFF. En revanche, en présence d'un stimulus spécifique, les deux macrocycles peuvent s'ouvrir (ils sont dits auto-immolables), libérant ainsi l'activité catalytique du Cu^+ (catalyseur en mode ON).

Si l'ouverture des anneaux moléculaires est elle-même catalytique, ces nouveaux catalyseurs OFF/ON peuvent servir à amplifier un signal, par exemple la détection de molécules organiques ou de métaux à de très faibles concentrations. Ainsi, grâce au contrôle de la rupture de la liaison mécanique de leurs caténanes de cuivre, les chimistes ont pu mettre en évidence la présence de palladium à des concentrations aussi faibles que 1 ppb (partie par milliard). L'activation des caténanes de cuivre pouvant être contrôlée de façon spatio-temporelle, elle permet également de déclencher la synthèse d'une molécule d'intérêt uniquement là où on le souhaite et lorsqu'on le souhaite.

Cette approche ouvre des perspectives pour le traitement localisé et parfaitement ciblé de tumeurs par un agent anticancéreux formé en leur sein de manière catalytique en évitant les effets secondaires sur les tissus sains.

• Source : CNRS, 20/12/2022.

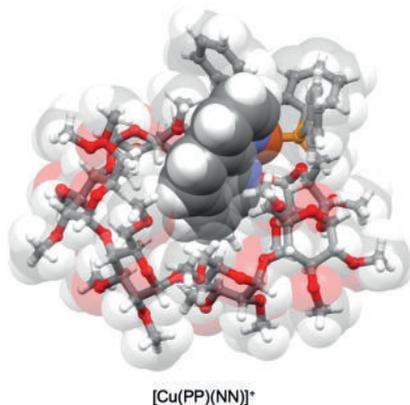
Réf. : A. Bessaguet, Q. Blancart-Remaury, P. Poinot, I. Opalinski, S. Papot, Stimuli-responsive catenane-based catalysts, *Angew. Chem. Int. Ed.*, 2022, <https://doi.org/10.1002/anie.202216787>

*Développée par K. Barry Sharpless et Morten Meldal (prix Nobel de chimie en 2022), la chimie click regroupe les réactions biocompatibles qui permettent d'accrocher chimiquement une biomolécule spécifique à un substrat choisi.

Une corbeille moléculaire tout en lumière

Un des défis majeurs de la chimie est d'effectuer des transformations efficaces tout en minimisant leur impact environnemental. Pour cela, le développement de photocatalyseurs qui permettent d'initier une réaction ou une transformation chimique en utilisant simplement l'énergie de la lumière solaire est un axe de recherche particulièrement dynamique. Elle nécessite de développer des matériaux à la fois stables

et aux propriétés photophysiques optimisées dans le spectre de la lumière visible pour produire l'action catalytique recherchée. Les meilleurs candidats sont des complexes métalliques luminescents à base de métaux rares et chers comme l'iridium ou le ruthénium. Une alternative plus écoresponsable ces dernières années concerne les complexes de cuivre, un métal bien plus abondant, meilleur marché et dont l'extraction pose moins de problèmes environnementaux.



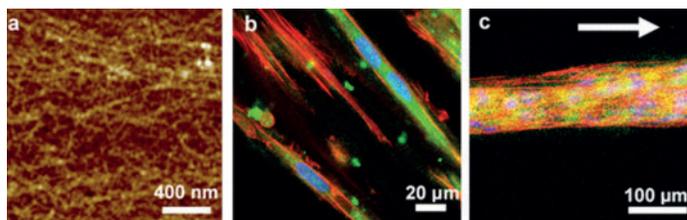
© Tuan-Anh Phan *et al.*

Les complexes métalliques de cuivre luminescents présentent une faible stabilité en solution et ne sont pas encore assez performants. Afin de pallier ces défauts, des chimistes de l'Institut de chimie de Strasbourg, du Laboratoire d'innovation moléculaire et applications (CNRS/Université de Strasbourg) et du Laboratoire de chimie de coordination (CNRS/Toulouse), en collaboration avec une équipe italienne, ont synthétisé un ligand phosphoré original qui, associé à des ligands azotés plus classiquement utilisés, permet d'obtenir des complexes de cuivre remarquablement stables en solution. Du fait de sa structure rigide, ce ligand joue le rôle d'une corbeille moléculaire qui permet d'optimiser les propriétés photophysiques de cette nouvelle famille de complexes métalliques. Ces derniers sont non seulement luminescents en solution, mais les temps de vie de leurs états excités, tant en solution qu'à l'état solide, sont parmi les plus longs jamais mesurés pour des complexes de cuivre. Ces résultats, qui ouvrent de nouvelles perspectives en photocatalyse, pourraient bien remplacer les photocatalyseurs actuels à base de métaux nobles.

• Source : CNRS, 20/12/2022.

Réf. : T.-A. Phan, N. Armadori, A. Saavedra Moncada, E. Bandini, B. Delavaux-Nicot, J.-F. Nierengarten, D. Armspach, Stable luminescent [Cu(NN)(PP)]⁺ complexes incorporating a β-cyclodextrin-based diphosphane ligand with metal-confining properties *Angew. Chem. Int. Ed.*, 2022, <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/anie.202214638>

Peindre des nanofilms de collagènes pour créer des tissus musculaires



(a) Fibres de collagène orientées des nanofilms. (b, c) Myoblastes humains (marquage des noyaux en bleu et le cytosquelette en rouge) orientés et différenciés en myotubes (marquage spécifique de l'actine en vert) après douze jours en culture sur les nanofilms. © Muhammad Haseeb Iqbal.

Le traitement et le remplacement de tissus musculaires malades ou endommagés pourrait bien être impacté par une nouvelle technique de peinture proposée par des scientifiques du CNRS et de l'INSERM.

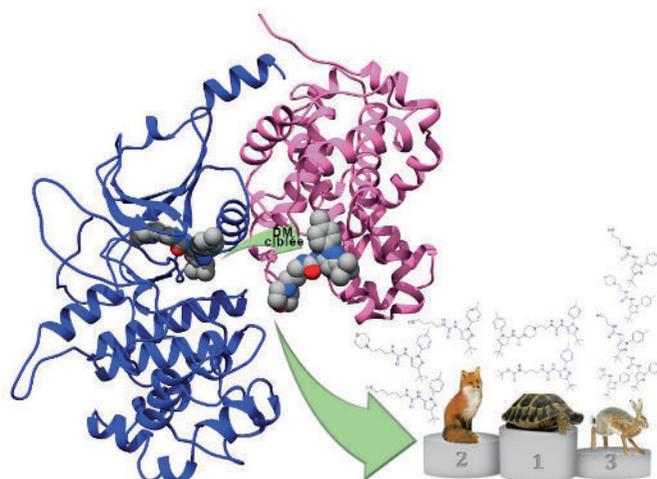
Les muscles sont des tissus orientés qui se développent à partir de cellules souches, appelées myoblastes. Au cours de leur différenciation, les myoblastes s'orientent et s'organisent pour former les myotubes qui composent les fibres musculaires. L'ingénierie de telles fibres *in vitro* motive une recherche très active car elle permettrait de traiter des blessures et des maladies musculaires. Si la culture et la différenciation de myoblastes sur des supports biocompatibles orientés a déjà permis de créer des tissus composés de myotubes organisés, les techniques utilisées jusqu'ici sont complexes et nécessitent un appareillage sophistiqué.

Des physico-chimistes de l'Institut Charles Sadron (CNRS/Université de Strasbourg), en collaboration avec des équipes du laboratoire Biomatériaux et Bioingénierie (INSERM/Université de Strasbourg) et du Centre for Research in Myology (INSERM/Sorbonne Université), ont récemment montré qu'un simple brossage au pinceau sur un support de verres de couches nanométriques de collagène, un polymère naturel très abondant, permettait de créer un nanofilm biocompatible très orienté sur lequel adhèrent les myoblastes. Leurs multiplication, croissance et orientation se produisent ensuite spontanément grâce à la forte orientation des fibres de collagène. Qui plus est, la différenciation des myoblastes en myotubes est favorisée et accélérée par l'utilisation d'acide tannique, autre molécule naturelle, en alternance avec les fibres de collagène. L'acide tannique est en effet connu pour contribuer à la santé musculaire en raison de ses propriétés antioxydantes et anti-inflammatoires. Ce procédé simple de brossage au pinceau permet le développement *in vitro* de tissus anisotropes qui pourraient remplacer des tissus humains endommagés, ou encore servir de système modèle pour le criblage de médicaments ciblant les fibres musculaires.

• Source : CNRS, 20/12/2022.

Réf. : M. Haseeb Iqbal, F.J.R. Revana, E. Pradel, V. Gribova, K. Mamchaoui, C. Coirault, F. Meyer, F. Boulmedais, Brush-induced orientation of collagen fibers in layer-by-layer nanofilms: a simple method for the development of human muscle fibers, *ACS Nano*, 2022, <https://doi.org/10.1021/acsnano.2c06329>

Prédire l'efficacité de candidats médicaments par leur temps de résidence sur leur cible



© Samia Aci-Sèche.

Le temps de résidence d'un médicament sur sa cible est un facteur clé dans la sélection d'un nouveau candidat médicament car la durée pendant laquelle une molécule reste liée à sa cible peut avoir un impact significatif sur son efficacité *in vivo*. La difficulté demeure de déterminer de façon systématique ce temps de résidence des composés dans les toutes premières étapes

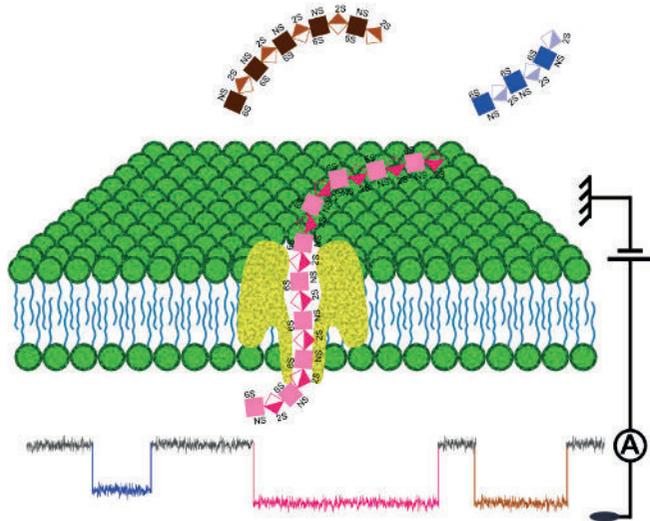
de découverte d'un nouveau médicament. En effet, il n'y a pas à l'heure actuelle de protocole de calcul permettant de prédire rapidement cette mesure, en particulier pour les médicaments qui ciblent des protéines de grandes tailles et flexibles.

Dans une publication récente, des scientifiques de l'Institut de chimie organique et analytique (ICOA, CNRS/Université d'Orléans) et de l'Institut de recherches Servier présentent un protocole basé sur des simulations de dynamique moléculaire ciblée. Celui-ci permet d'obtenir des informations cruciales sur le mécanisme de dissociation du ligand avec sa cible. Cette méthode a été évaluée sur un ensemble de dix inhibiteurs bien connus de la protéine CDK8, une cible thérapeutique large et flexible. Les temps de résidence de ces inhibiteurs, évalués expérimentalement, varient de l'échelle de la minute à celle des heures. La méthode a permis de classer efficacement ces composés par rapport à leur temps de résidence expérimental. L'analyse des interactions protéine-ligand le long des trajectoires de dissociation a mis en évidence la contribution favorable des contacts hydrophobes sur le temps de résidence des composés et identifié certains résidus clés de la protéine. Cet outil théorique, qui s'inscrit dans un axe de recherche de l'équipe déjà présenté en 2020 et qui vise à mettre au point des outils prédictifs des paramètres cinétiques des inhibiteurs de protéines, devrait permettre d'avancer plus rapidement dans le choix de nouveaux candidats médicaments.

• Source : CNRS, 10/01/2023.

Réf. : S. Ziada, J. Diharce, E. Raimbaud, S. Aci-Sèche, P. Ducrot, P. Bonnet, Estimation of drug-target residence time by targeted molecular dynamics simulations, *Journal of Chemical Information and Modeling*, 2022, DOI:10.1021/acs.jcim.2c00852

Décrypter les GAG : une nouvelle voie de séquençage de polysaccharides



© Régis Daniel.

Le séquençage est une technique d'analyse qui permet de remonter à l'enchaînement exact des briques constitutives d'un biopolymère. Si de nombreuses méthodes de lecture et d'analyses structurales ont été mises au point pour l'ADN ou diverses protéines, le séquençage des polysaccharides de la famille des glucides, est quant à lui très en retard. Décrypter la structure exacte de certains polysaccharides bioactifs, et parmi eux les glycosaminoglycans (GAG) exprimés à la surface des cellules et dans la matrice extracellulaire où ils jouent un rôle central dans la communication des cellules avec leur environnement, s'avère pourtant essentiel. Les GAG sont des polysaccharides linéaires fortement anioniques, sulfatés pour la

plupart, et constitués d'unités disaccharidiques. Ils présentent une extraordinaire complexité structurale de par les combinaisons innombrables de ces unités, ce qui rend les méthodes biostructurales conventionnelles peu efficaces.

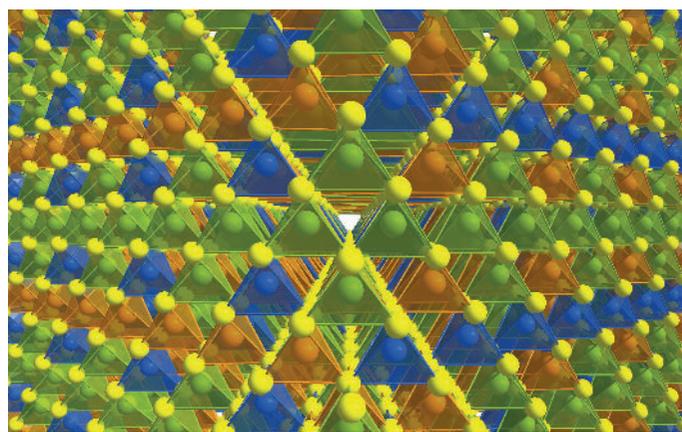
Dans ce contexte, une équipe du Laboratoire analyse, modélisation, matériaux pour la biologie et l'environnement (LAMBE, CNRS/Université Paris-Saclay, Univ. Evry) propose une approche innovante qui exploite les propriétés de confinement et de translocation de biomolécules individuelles à travers des nanopores de nature protéique. Le principe de détection et d'analyse structurale par nanopore repose sur la mesure du courant ionique entre deux chambres soumises à une tension et séparées par une membrane lipidique. Un courant ne peut être mesuré que lorsqu'un pore nanométrique traverse la membrane et relie les deux chambres. Lorsqu'une biomolécule traverse le pore, elle en obstrue une partie plus ou moins importante en fonction de sa taille et des caractéristiques structurales, ce qui entraîne une diminution proportionnelle du courant. Cette diminution permet non seulement la détection de la biomolécule, mais constitue une véritable signature structurale de cette dernière dont les caractéristiques peuvent être déduites.

Appliquée aux GAG, cette stratégie a permis la mise en évidence de différentes séquences d'oligosaccharides variant par leur taille (degré de polymérisation), le type d'unités constitutives disaccharidiques, le type de liaisons et les différentes modifications distribuées le long de la chaîne. La discrimination des briques constitutives atteinte dans cette étude constitue une étape importante vers le séquençage de ces glucides.

• Source : CNRS, 10/01/2023.

Réf. : P. Bayat, C. Raimbaud, B. Priem, M. Bourderioux, M. Bilong, S. Poyer, M. Pastoriza-Gallego, A. Oukhaled, J. Mathé, R. Daniel, Comprehensive structural assignment of glycosaminoglycan oligo- and polysaccharides by protein nanopore, *Nat. Commun.*, 2022, <https://doi.org/10.1038/s41467-022-32800-4>

Mieux comprendre la cristallographie à l'origine des propriétés thermoélectriques



© Emmanuel Guilmeau.

Des scientifiques du laboratoire de Cristallographie et sciences des matériaux (CRISMAT/CNRS/Université Caen Normandie/ENSICAEN), de l'Institut des sciences chimiques de Rennes (ISCR/CNRS/Université Rennes 1/ENSCR/INSA Rennes) et de l'Institut Jean Lamour (IJL/CNRS/Université de Lorraine) montrent que la structure cristalline et la composition du composé $\text{Cu}_7\text{Sn}_3\text{S}_{10}$ publiée en 2020⁽¹⁾, ainsi que l'interprétation de ses propriétés thermoélectriques remarquables, sont erronées. En combinant des analyses structurales par diffraction des rayons X et par microscopie électronique à transmission, les chercheurs démontrent que

la structure cristalline n'est pas tétragonale mais cubique et semblable à celle du composé $\text{Cu}_{22}\text{Sn}_{10}\text{S}_{32}$, découvert par les équipes du CRISMAT et de l'ISCR en 2021⁽²⁾.

Cette étude, parue dans la revue *Energy & Environmental Science*, met en évidence la complexité des phénomènes d'ordre/désordre dans les sulfures du cuivre et l'importance de l'analyse structurale pour mieux comprendre l'influence subtile de la cristallographie sur les propriétés de transport dans cette vaste famille de composés.

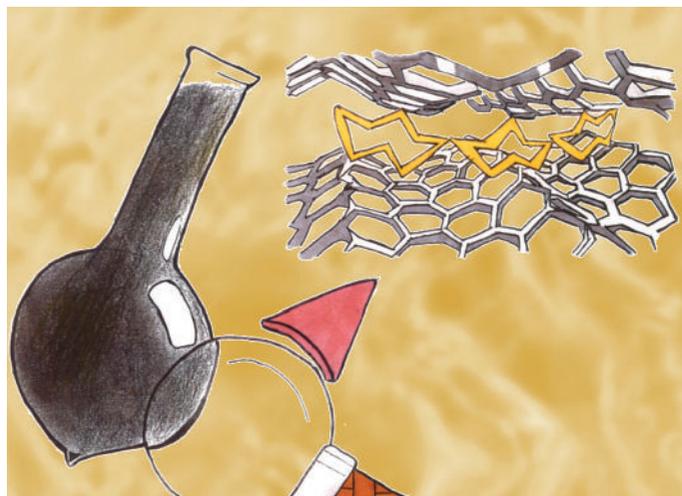
• Source : CNRS, 20/12/2022.

Réf. : P. Lemoine, B. Raveau, P. Boullay, E. Guilmeau, Comment on the "Discovery of high-performance thermoelectric copper chalcogenide using modified [. . .]", *Energy Environ. Sci.*, 2022, <https://pubs.rsc.org/en/content/articlelanding/2023/ee/d2ee01588a#!>

⁽¹⁾ T. Deng *et al.*, Discovery of high-performance thermoelectric copper chalcogenide using modified diffusion-couple high-throughput synthesis and automated histogram analysis technique, *Energy Environ. Sci.*, 2020, 13, 3041, <https://pubs.rsc.org/en/content/articlelanding/2020/ee/d0ee02209h>

⁽²⁾ V. Pavan Kumar *et al.*, Local disorder-induced low thermal conductivity in degenerate semiconductor $\text{Cu}_{22}\text{Sn}_{10}\text{S}_{32}$, *Inorg. Chem.*, 2021, 60, 16273, <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acs.inorgchem.1c02105?ref=PDF>

Décrypter les interactions soufre-carbone pour optimiser les cathodes des batteries Li-S



Ce dessin illustre le principe de la microcalorimétrie d'immersion : une ampoule en verre contenant un échantillon de carbone microporeux est scellée sous vide. L'extrémité cassante du bulbe est brisée dans le soufre liquide à l'intérieur d'une cellule calorimétrique. Le soufre liquide constitué principalement d'anneaux S8 mouille l'ensemble de la surface disponible, y compris les micropores. © Vanessa Coulet.

Les batteries lithium-soufre (Li-S) du futur pourraient être composées d'une anode métallique en lithium et d'une cathode en soufre. En effet, le couple Li-S présente une densité d'énergie théorique de 2 500 kW/kg bien plus élevée que les couples électrochimiques actuellement utilisés dans les batteries Li-ion, d'où son intérêt pour être intégré à ce type de dispositif. Hélas, le soufre est un isolant et doit être confiné dans des matrices poreuses de carbone pour réaliser des électrodes (cathodes) conductrices. L'efficacité des électrodes va alors dépendre de la taille de pores de la matrice de carbone, de l'interaction entre les atomes de soufre et de carbone qui influence la stabilité de l'électrode, et de l'étendue de la surface de carbone en contact direct avec le soufre.

Des scientifiques du laboratoire MADIREL (CNRS/AMU) ont utilisé la thermodesorption et la calorimétrie d'immersion pour décrire comment le soufre était piégé dans les micropores. Ils ont ainsi évalué l'énergie d'interaction entre le soufre et la surface des carbones poreux. Leurs résultats montrent que les interactions soufre/carbone dépendent peu de la structure du réseau poreux, que les éventuels effets de chimisorption sont

négligeables, et que la surface totale accessible au soufre est comparable à celle déterminée par la méthode « classique » d'adsorption d'azote à 77 K. Ces résultats ouvrent la voie à une imprégnation mieux contrôlée des carbones poreux par le soufre pour des cathodes de batteries Li-S aux propriétés optimisées.

• Source : CNRS, 20/12/2022.

Réf. : M.-V. Coulet, L. Gourmellen, R. Denoyel, Energetics of sulfur-carbon interaction, *ChemPhys Chem*, 2022, 23(24), e2022004, <https://doi.org/10.1002/cphc.202200416>

Industrie

TotalEnergies met en service BioBéarn, la plus grande unité de méthanisation en France



Méthaniseur de BioBéarn. © TotalEnergies.

Leader du secteur du biogaz en France, TotalEnergies a démarré sa 18^e unité de production – soit sept unités de méthanisation produisant du biométhane, injecté dans le réseau gazier, et onze unités de production de biogaz fournissant de l'électricité et de la chaleur, via la cogénération – qui sera, avec une capacité maximale de 160 GWh, la plus importante du pays. Baptisée BioBéarn et située à Mourenx (Pyrénées-Atlantiques), cette nouvelle unité, alimentée en déchets organiques, a commencé à injecter, dans le réseau de transport de gaz naturel opéré par Téréga, ses premiers m³ de biométhane, un gaz à la fois renouvelable, décarboné et produit localement. Elle en produira 69 GWh en 2023, puis montera progressivement en puissance pour répondre à une demande de biogaz en forte croissance.

Ce projet, qui illustre la volonté de TotalEnergies de promouvoir l'économie circulaire, permet de valoriser 220 000 tonnes de déchets organiques (résidus provenant d'activités agricoles et de l'industrie agro-alimentaire) en 200 000 tonnes par an de digestat, un fertilisant naturel qui sera valorisé en épandage agricole sur des parcelles cultivées dans un rayon de 50 km autour de l'unité (permettant une réduction de près de 5 000 tonnes d'engrais chimique) et 160 GWh de biométhane, soit l'équivalent de la consommation annuelle moyenne de 32 000 habitants.

BioBéarn permet plus particulièrement au bassin de Lacq, historiquement tourné vers les activités gazières, de poursuivre sa stratégie de croissance locale et durable, cette nouvelle unité permettant d'éviter l'émission de 32 000 tonnes de CO₂ par an.

Le développement de BioBéarn, engagé en 2016, est le fruit d'une concertation engagée avec l'ensemble des parties prenantes locales – dont plus de 200 agriculteurs et industriels agroalimentaires, les riverains et les représentants locaux et élus – permettant au projet de s'adapter aux besoins et potentiels du territoire.

Leader du secteur en France avec désormais près de 700 GWh de capacité de production de biogaz, TotalEnergies a pour ambition de devenir un acteur majeur du marché à l'international. Le groupe vise à produire 20 TWh par an d'ici à 2030, soit l'équivalent de la consommation annuelle moyenne de 4 millions de consommateurs français, pour une réduction d'émissions de CO₂ de 4 millions de tonnes.

• Source : TotalEnergies, 12/01/2023.

Chemours investit dans l'Oise pour accompagner l'essor de l'hydrogène bas carbone

Le groupe américain Chemours va investir environ 186 millions d'euros sur son site chimique de Villers-Saint-Paul (Oise) pour y produire des membranes essentielles pour les applications de l'hydrogène bas carbone (électrolyse de l'eau, piles à combustibles). Quatre-vingt postes seront créés et deux bâtiments édifiés d'ici au début de l'année 2025 pour ces productions que Chemours ne fabrique qu'aux États-Unis aujourd'hui.

L'investissement de Chemours est dépendant de l'obtention de tous les permis et licences habituels nécessaires à la construction et à l'exploitation du site de Villers-Saint-Paul, d'une superficie de 40 hectares, qui comprendra le développement de la production d'ionomères et des membranes associées afin de fournir une capacité supplémentaire dans la chaîne d'approvisionnement des matériaux Nafion™.

La technologie de membranes échangeuses de protons (« proton exchange membrane », PEM) Nafion™ est l'une des solutions les plus prometteuses en matière de production d'hydrogène vert. Elle offre plusieurs avantages, notamment un démarrage plus rapide, moins de composants, une empreinte plus faible, un entretien plus simple et zéro émission lorsqu'elle est couplée à une énergie renouvelable.

Cet investissement traduit l'engagement de Chemours en faveur d'une fabrication responsable, tout en soutenant l'objectif de responsabilité sociale d'entreprise à l'horizon 2030 dont l'objectif est de générer 50 % ou plus de ses revenus à partir de produits contribuant aux objectifs de développement durable des Nations unies.

Cet investissement s'ajoute aux efforts déployés aux États-Unis pour disposer d'une chaîne d'approvisionnement fiable et d'une capacité robuste au service de l'économie de l'hydrogène. Il répondra à la demande croissante du marché pour la production d'hydrogène propre à l'aide d'électrolyseurs à eau, le stockage d'énergie dans des batteries à écoulement et la

conversion de l'hydrogène pour alimenter les véhicules à piles à combustible, tout en contribuant aux efforts européens et mondiaux pour permettre la transition vers une énergie propre.

• Source : Chemours, 11/01/2023.

Enseignement et formation

Un équipement exceptionnel bientôt à Grenoble INP



© SIMAP.

Dans le cadre du Contrat de plan État-Région (CPER) 2021-2027, une sonde atomique tomographique de nouvelle génération (la première en France et la deuxième en Europe) sera installée au Laboratoire de science et ingénierie des matériaux et procédés (SIMAP, CNRS, Grenoble INP-UGA). Gérée par la plateforme technologique CMTC dès mai 2023, elle sera accessible aux partenaires industriels et académiques.

La sonde atomique tomographique est une technique d'analyse tridimensionnelle de haute résolution qui permet d'observer la distribution spatiale des atomes dans un matériau. On obtient une cartographie de la distribution des atomes dans l'échantillon avec une résolution atomique en trois dimensions. La machine permet une reconstruction de 10 à 100 millions d'atomes en quelques heures.

La nouvelle version de la machine combine les impulsions d'un laser femtosecondes dans l'ultraviolet avec l'impulsion électrique. Cela permet d'analyser à peu près tous les matériaux, depuis les alliages métalliques jusqu'aux matériaux non conducteurs : roches, céramiques, semi-conducteurs, nitrures, oxydes... voire des électrolytes liquides de batteries solidifiés par le froid. La longueur d'onde du laser, diminuée par rapport aux générations précédentes, permet de limiter l'échauffement de la pointe et donc de limiter le mouvement

Retrouvez l'intégralité du colloque « Pasteur, un visionnaire »



200 ANS

LOUIS PASTEUR

1822 – 1895

Organisé par l'Académie des sciences et l'Académie française le 8 décembre 2022, ce colloque s'inscrivait dans le cadre des célébrations du bicentenaire de la naissance de Louis Pasteur. Si Louis Pasteur est célèbre pour son vaccin contre la rage, qui lui valut le qualificatif de « bienfaiteur de l'humanité », l'ampleur de son œuvre scientifique est moins connue, alors qu'elle impacte aujourd'hui encore notre vie quotidienne, la recherche et la médecine.

• www.academie-sciences.fr/fr/Seances-publiques/pasteur-un-visionnaire.html

des atomes avant leur évaporation, améliorant la résolution de l'instrument. La combinaison des impulsions électriques et laser, qui sera unique en France, permettra une ionisation plus efficace dans les matériaux réputés difficiles à mesurer. La reconstruction 3D d'un échantillon peut être utile pour créer des matériaux architecturés à l'échelle nanométrique répondant à des propriétés spécifiques (mécaniques, électroniques...) en fonction des applications visées. Elle pourra en outre être mise à profit pour voir comment évolue un matériau pendant sa fabrication et son utilisation afin de maîtriser sa durabilité.

Parmi les utilisations possibles figure le recyclage des matériaux. Lors du recyclage, les matériaux sont mélangés et des espèces chimiques indésirables se logent dans les défauts cristallins. La sonde atomique peut aider à comprendre la nocivité éventuelle de ces défauts.

En géologie, la technique peut être utilisée pour réaliser des mesures isotopiques, pour des datations par exemple, ou encore pour étudier les déformations, les mélanges, et au final l'histoire de la roche.

• Source : Grenoble INP – UGA, 15/12/2022.

À propos des femmes ingénieures...

Qui sont les femmes ingénieures ? Quels métiers exercent-elles ? Quelle est leur rémunération ? La nouvelle édition de l'Observatoire publié par l'association Femmes Ingénieures répond à ces questions*.

Sur une population totale d'environ un million d'ingénieurs en activité, on compte 24 % de femmes ingénieures, et 30 % d'étudiantes ingénieures, chiffre qui n'augmente plus depuis dix ans ; le monde de l'ingénieur est donc encore largement masculin.

C'est dans les tranches d'âge en dessous de 40 ans que le pourcentage de femmes ingénieures est le plus élevé (34,3 % pour la tranche des 30-39 ans, 29 % pour les moins de 30 ans).

Le passage par les classes préparatoires classiques (CPGE) est toujours la voie principale (52 %) pour accéder aux études d'ingénieurs même si la part des ingénieurs issus de prépas intégrées augmente, notamment chez les femmes (25 %). Les classes préparatoires classiques représentaient 57 % des formations d'origine des jeunes femmes ingénieures en 2017. Le nombre de femmes ingénieures venant de prépas intégrées a augmenté dans le même temps de cinq points.

La part d'ingénieures de moins de 30 ans, qui ont obtenu leur diplôme d'ingénieur, sous statut « apprenti », dépasse légèrement 10 %. C'est une voie de professionnalisation très intéressante, qui permet également de financer ses études.

Le salaire brut médian annuel varie selon l'activité dominante, le lieu de l'activité, la taille de l'entreprise, mais aussi selon le type de contrat. Il est de 50 100 € pour les femmes, alors que celui des hommes est de 58 900 €, soit 18 % de plus. En 2019, il était de 49 700 €, tandis que celui des hommes était de 60 120 €, soit 21 % de plus. L'écart entre les salaires médian entre les femmes et les hommes ingénieurs semble se réduire, mais ce constat est à nuancer en raison du ralentissement de la fluidité du marché du travail pendant les années Covid. Le salaire évolue en fonction de la tranche d'âge, ce qui permet de relever que le salaire des ingénieures évolue de manière moins conséquente que celui des ingénieurs.

Concernant l'emploi, les CDD sont deux fois plus nombreux chez les femmes que chez les hommes. On constate un écart de près de 8 points au niveau des CDI en défaveur des femmes ingénieures. Si les femmes ingénieures connaissent le plein emploi (moins de 5 % de chômage) et 72 % d'entre elles n'ont jamais connu de période de chômage depuis le début de leur carrière, 42 % des femmes ingénieures ne possèdent aucune responsabilité (contre 33 % des ingénieurs hommes), toutes formes de responsabilités confondues (hiérarchiques, budgétaires ou portant sur des résultats financiers). Ceci a évidemment un impact sur les salaires, puisque les responsabilités vont de pair avec un niveau de salaire plus élevé.

Les ingénieures sont les plus représentées dans de nombreux secteurs comme celui de l'industrie (35 %), des activités tertiaires (hors sociétés de services) (35 %) et sociétés de services et édition de logiciels (13 %). D'autre part, les femmes sont plus représentées que les hommes dans les secteurs du tertiaire, de l'agriculture, de la sylviculture et de l'eau et la dépollution, qui sont également les moins rémunérateurs. Les études, la recherche et la conception sont les activités les plus représentées chez les ingénieurs, femmes ou hommes. Les postes de direction générale arrivent en deuxième position des activités les moins représentées dans la population des femmes, alors qu'ils sont dans le top 4 des activités où l'on retrouve le plus d'hommes. Environ un quart des ingénieurs femmes ou hommes exercent des fonctions dans lesquelles on n'imagine pas forcément des ingénieurs, telles que commerciales, marketing, audit & gestion.

D'après l'étude menée, la part des femmes ressentant de l'inquiétude envers leur entreprise augmente en fonction de l'âge, ce qui signifierait qu'elles sont de moins en moins confiantes envers leur entreprise au fil de leur carrière professionnelle (la part de femmes (très) inquiètes passe de 11 à 19 % entre les moins de 30 ans et les 50-64 ans). Il en est de même pour le désenchantement des femmes envers leur entreprise, bien que la majorité reste enthousiaste ou neutre, toutes générations confondues. On peut y voir la conséquence de l'expérience des difficultés à progresser dans leur carrière.

« La pénurie d'ingénieurs commence à se faire ressentir dans le monde de l'industrie. Chaque année en France, il faudrait 60 000 nouveaux ingénieurs, or seulement 44 000 sont formés par an. De plus, avec la réforme du bac, les jeunes et surtout les filles choisissent de moins en moins les filières scientifiques » précise Aline Aubertin, présidente de l'association.

• Source : Femmes Ingénieures, 12/01/2023.

*L'étude s'appuie sur les données recueillies lors de l'enquête annuelle de la Société des Ingénieurs et Scientifiques de France (IESF) parue en 2022 et basée sur des données 2021. Le sondage repose sur plus de 52 000 réponses, dont 12 730 de femmes ingénieures.