



UNIVERSITÉ
CAEN
NORMANDIE

PRISME

- UNIR & INNOVER -

N°21

JUIN 2026

ÉNERGIES

LE NUCLÉAIRE AU SERVICE DE LA TRANSITION ÉNERGÉTIQUE

« La Normandie est la région où se concentrent tous les enjeux de l'électricité décarbonée » | [4](#)

Relance du nucléaire : la recherche et la formation au cœur des enjeux | [5](#)

Le nucléaire, outil de pointe pour la médecine | [6](#)

Nucléaire : une filière, des parcours professionnels multiples | [7](#)

ÉNERGIES MARINES : UN POTENTIEL À RÉVÉLER

Hydrolienne : l'énergie venue des courants marins | [8](#)

La modélisation numérique éclaire le potentiel des courants marins | [10](#)

Comprendre les mouvements de la mer : l'approche expérimentale | [11](#)

Éoliennes en mer : quel impact sur les écosystèmes ? | [12](#)

Protéger les zones côtières face à l'assaut des vagues | [13](#)

DES MATÉRIAUX INNOVANTS POUR UNE ÉNERGIE DÉCARBONÉE

Vers une nouvelle génération de panneaux solaires ? | [14](#)

Énergie solaire : les promesses des matériaux pérovskites | [15](#)

Transition énergétique : les défis de la neutralité carbone | [16](#)



ÉNERGIES DÉCARBONÉES, ÉNERGIES RENOUVELABLES RELEVER LES DÉFIS DE DEMAIN

Notre dépendance au pétrole, au charbon et au gaz reste importante : les énergies fossiles représentent encore près de 60% de l'énergie consommée en France (à l'échelle mondiale, cette part s'élève à 80%). Mais l'accélération du changement climatique et les tensions géopolitiques le révèlent de façon alarmante : la question des énergies fossiles se situe aujourd'hui à un tournant.

Avec la troisième Programmation pluriannuelle de l'énergie (PPE3), la France s'est dotée, en février 2026, d'une nouvelle feuille de route pour atteindre la neutralité carbone à l'horizon 2050. Au cœur de cette stratégie se trouvent la relance du nucléaire et le soutien aux énergies renouvelables afin de diversifier le mix électrique. La France veut s'appuyer sur le savoir-faire maîtrisé de la filière nucléaire pour répondre aux enjeux de décarbonation et d'indépendance énergétique. En parallèle, le déploiement des énergies renouvelables offre la perspective d'une production plus locale et flexible, essentielle pour accélérer l'électrification des usages.

Le monde change vite : l'université doit anticiper, s'adapter, innover et accompagner ces transformations. L'université de Caen Normandie s'investit pleinement pour relever ces défis, aux côtés des collectivités, des entreprises et des acteurs de l'enseignement supérieur et de la recherche qui continuent, au fil des années, de nous témoigner leur confiance. La signature de conventions partenariales structurantes avec EDF puis Orano, la construction d'un bâtiment dédié à la physique nucléaire, le lancement de l'initiative européenne Nuclear meets Region, ou encore la création du réseau Skills4Nuclear illustrent une ambition partagée : faire de la Normandie un territoire de pointe en



matière d'énergie nucléaire, de la formation à la production, en passant par la recherche et l'innovation.

La décarbonation du mix énergétique passera également par le développement des énergies marines renouvelables. La France dispose d'un potentiel énergétique important grâce à ses atouts naturels, à ses infrastructures portuaires et à son tissu industriel. La Normandie, en particulier, bénéficie d'une vaste façade maritime, balayée par des vents réguliers et par le puissant courant du raz Blanchard – autant de conditions favorables au développement de l'hydrolien et de l'éolien en mer. Forte de ses recherches en mécanique, en hydrodynamique côtière et en écologie marine, l'université de Caen Normandie accompagne, depuis plus de quinze ans, l'essor des énergies marines renouvelables.

Ce numéro de *Prisme* s'inscrit pleinement dans l'engagement de l'université à éclairer les transformations en cours. Il met en lumière des projets qui contribuent concrètement, par la recherche et la formation, aux réponses attendues face aux défis de la transition énergétique : nouveaux procédés de fabrication, connaissance des mécanismes de vieillissement, évaluation de la ressource, efficacité énergétique, décarbonation de l'industrie, adaptation aux risques climatiques, préservation de la biodiversité et des milieux... Ce nouveau numéro réaffirme ainsi la place de l'université comme acteur de premier plan dans la production de connaissances, la formation des compétences et l'accompagnement des transitions, au service des grands enjeux scientifiques, industriels et sociétaux.



« LA NORMANDIE EST LA RÉGION OÙ SE CONCENTRENT TOUS LES ENJEUX DE L'ÉLECTRICITÉ DÉCARBONÉE »

Pour réduire progressivement notre empreinte carbone et assurer l'indépendance énergétique, l'État français mise sur le nucléaire, pilier du mix énergétique, tout en accompagnant la montée en puissance des énergies renouvelables. Formation, insertion professionnelle, innovation... Tour d'horizon des enjeux avec Alban Verbecke, directeur de l'action régionale EDF Normandie et président de la filière Normandie Énergies.

DE QUOI LA FILIÈRE NUCLÉAIRE A-T-ELLE BESOIN, CONCRÈTEMENT ?

La relance du nucléaire, annoncée par le président de la République Emmanuel Macron en 2022, et confirmée dans la Programmation pluriannuelle de l'énergie (PPE 3) de 2026, prévoit la construction de deux nouveaux EPR2 à Penly, en Seine-Maritime. Leur mise en service est attendue à l'horizon 2037-2038 et la Normandie comptera alors 11 réacteurs en production.

Dans ce contexte, les besoins de la filière sont considérables, non seulement pour développer ces nouveaux programmes, mais aussi pour prolonger la durée de vie des réacteurs existants jusqu'à 60 ans minimum. Au total, environ 12 000 recrutements sont prévus au cours des dix prochaines années, dont 10 % de profils ingénieurs. À ceci s'ajoute le programme Aval du futur, porté par Orano la Hague, qui prévoit la construction d'une nouvelle usine de traitement-recyclage de combustibles usés. Ce projet industriel nécessitera à lui seul 8 000 salariés supplémentaires.

La filière s'inscrit donc résolument dans le temps long. Construction, exploitation, commercialisation, pilotage, maintenance, sûreté, radioprotection, recyclage, démantèlement... Les compétences recherchées sont très variées. Nous avons besoin de jeunes talents qui pourront s'engager pleinement dans ces projets d'envergure. Les étudiantes et étudiants qui choisissent aujourd'hui la filière énergie peuvent envisager de très beaux parcours professionnels.

QUELLE PLACE POUR LES ÉNERGIES RENOUVELABLES DANS LE MIX ÉNERGÉTIQUE DE DEMAIN ?

Pour sortir des énergies fossiles, il est indispensable d'accélérer l'électrification des usages, tout en continuant à produire une électricité décarbonée. La PPE 3 affirme l'intérêt de l'énergie nucléaire et des énergies renouvelables dans la transition énergétique. Cela implique de déployer de nouvelles capacités de production en complément du nucléaire – et donc d'accélérer le développement des énergies renouvelables.



Alban Verbecke, directeur de l'action régionale EDF Normandie et président de la filière Normandie Énergies, à l'occasion de la cérémonie des Trophées Phénix 2025 de l'université de Caen

La Normandie est la région où se concentrent tous les enjeux de l'électricité décarbonée : le territoire joue un rôle moteur dans la relance du nucléaire et dans le développement des énergies marines. Le potentiel est considérable. C'est en Normandie que sera mise en service, au large du raz Blanchard, la ferme hydrolienne marine la plus puissante jamais déployée. Et, dans les dix prochaines années, y seront installés les plus grands parcs éoliens offshore de France, avec, à l'horizon de la prochaine décennie, un potentiel d'environ 10 000 emplois cumulés, directs et indirects, pour l'ensemble de la filière des énergies marines renouvelables en Normandie.

EDF ET L'UNIVERSITÉ DE CAEN NORMANDIE ONT SIGNÉ UNE CONVENTION COMMUNE EN OCTOBRE 2023. QU'EST-CE QUI A MOTIVÉ CE PARTENARIAT ?

Il s'agit du premier partenariat formel entre EDF et une université en Normandie. Cette coopération est essentielle au regard des grands projets industriels en cours en Normandie. EDF souhaite s'appuyer sur l'excellence scientifique et technologique de l'université de Caen Normandie pour garantir le niveau de compétences requis dans ses métiers. En ce sens, le groupe EDF accueille des stagiaires, des étudiants et étudiantes en alternance, des doctorants et doctorantes. EDF a également renforcé ces dernières années ses collaborations avec les composantes de l'université, notamment l'ESIX Normandie, afin de répondre aux besoins en ingénieurs, en particulier pour le centre nucléaire de Flamanville.

EDF et UNICAEN sont pleinement engagés dans le projet 3NC (Normandie nucléaire, nouvelles compétences) pour développer les compétences de la filière nucléaire. Porté par la Région Normandie, 3NC contribue à renforcer l'attractivité des formations et à accompagner la montée en compétences. La halle technologique (voir page 5), qui formera chaque année 750 étudiants en physique nucléaire, en est une illustration. Les deux partenaires travaillent également à la massification et à la coloration nucléaire des formations, avec l'appui de l'Université des métiers du nucléaire, et agissent ensemble pour renforcer l'attractivité des métiers de la filière.

Le partenariat avec l'université de Caen Normandie se traduit également par du mécénat de compétences : Carole Montchy-Leroy, ingénieure R&D, spécialisée dans les matériaux et la corrosion sous contraintes, est détachée pour travailler en synergie et faciliter les échanges. Ces interactions, essentielles, permettent de nourrir l'innovation et d'anticiper les besoins concrets de la filière — un enjeu déterminant pour son avenir. Enfin, le partenariat entre EDF et l'université de Caen Normandie a conduit EDF à rejoindre la Fondation 1432, notamment pour soutenir l'internationalisation des compétences nucléaires, à travers la création d'un réseau européen de Centres d'excellence professionnelle (CEP) associant formation, enseignement supérieur, recherche appliquée et industrie.

LE NUCLÉAIRE EN NORMANDIE

La Normandie est la 4^e région productrice d'électricité en France, avec trois sites de production et un site de recyclage de combustibles usés. Le poids économique de la filière nucléaire en Normandie dépasse 1 milliard d'euros chaque année : c'est le secteur d'activité le plus important, avec plus de 22 000 emplois directs. Le groupe EDF compte plus de 9 300 collaborateurs et collaboratrices en Normandie.

RELANCE DU NUCLÉAIRE : LA RECHERCHE ET LA FORMATION AU CŒUR DES ENJEUX

La relance du nucléaire et le développement des technologies associées nécessitent de renforcer l'offre de formation afin de répondre aux besoins croissants du secteur. Dans le même temps, l'accélération de la recherche et de l'innovation apparaît essentielle pour accompagner ces mutations. Le point avec Yves Lemière, enseignant-chercheur en physique nucléaire.

QUELLES SONT AUJOURD'HUI, À L'UNIVERSITÉ DE CAEN NORMANDIE, LES GRANDES THÉMATIQUES DE RECHERCHE EN PHYSIQUE NUCLÉAIRE ?

Depuis sa création en 1947, le LPC Caen mène des recherches fondamentales et appliquées, en lien étroit avec le Grand accélérateur national d'ions lourds (GANIL) et le Centre de recherche sur les ions, les matériaux et la photonique (CIMAP). Au fil des années, nos activités se sont diversifiées avec une ouverture vers de nouvelles thématiques, telles que l'étude des neutrinos ou des ondes gravitationnelles. Ces travaux s'inscrivent dans des collaborations internationales d'envergure, à l'image du projet KM3Net dédié à la détection des neutrinos, qui réunit 350 scientifiques issus de 68 instituts de recherche à travers le monde. Le laboratoire développe une expertise reconnue dans l'étude de la réactivité des réacteurs nucléaires de nouvelle génération, ainsi que dans la conception d'instruments de mesure pour la médecine nucléaire et les traitements par hadronthérapie.

Nous menons également, dans le cadre du projet *Spatial applications at Ganil (SAGA)*, des tests d'irradiation sur des composants embarqués à bord des satellites. Les systèmes électroniques étant particulièrement sensibles aux rayonnements cosmiques, ces travaux sont nécessaires pour veiller au bon déroulement des missions spatiales. Ce projet s'appuie sur la plateforme Normandie Accélérateurs, qui s'adresse aux industriels du spatial, de la défense et du nucléaire : elle permettra de simuler, au plus près des conditions réelles, les différents types de rayonnements rencontrés dans l'espace et susceptibles d'endommager les systèmes électroniques des engins spatiaux.

EN QUOI LE PROJET CAESAR VIENT-IL RENFORCER CETTE DYNAMIQUE ?

Caesar, lauréat de l'appel à projet ExcellencES, vient consolider les forces qui font la spécificité de l'université de Caen Normandie : c'est dans ce contexte qu'a été créé le Centre de physique nucléaire, regroupant le LPC Caen, le CIMAP et le GANIL. Ce rapprochement permet de dynamiser des collaborations de recherche

sur les nouvelles installations de SPIRAL2 au GANIL, dans les domaines de la physique nucléaire fondamentale, mais aussi de l'énergie nucléaire et des applications interdisciplinaires. Pour accompagner cette montée en puissance, deux chaires en physique nucléaire ont été créées : elles ont permis d'attirer un chercheur et une chercheuse de haut niveau. Le Centre de physique nucléaire organise aussi des écoles d'été pour favoriser les échanges scientifiques, et propose des bourses destinées à attirer des étudiants et étudiantes vers notre graduate school et nos formations doctorales.

COMMENT LE PROJET 3NC RÉPOND-IL AUX BESOINS CROISSANTS DE LA FILIÈRE NUCLÉAIRE ?

La relance du nucléaire, annoncée en 2022, a ouvert de nouvelles perspectives pour l'enseignement et la formation. Cette année-là, la Région Normandie a répondu à l'appel à manifestation d'intérêt Compétences et métiers d'avenir, avec le projet Normandie nucléaire nouvelles compétences (3NC). L'université de Caen Normandie coordonne deux axes majeurs : la densification de l'offre de formation et la professionnalisation.

Elle propose aujourd'hui un large éventail de formations de la licence au doctorat, accessibles en formation initiale, continue et en alternance. Trois parcours de master sont disponibles : Contrôle de l'environnement industriel ; Noyaux, atomes, collisions, adossé au programme d'excellence européen Nucphys et à la graduate school Normandy Nuclear Physics (N2P) ; et Radioprotection, qui est co-accrédité avec l'Institut national des sciences et techniques nucléaires (INSTN). Et ce n'est pas tout : cette offre est appelée à s'enrichir, avec de nouveaux parcours en préparation pour répondre aux besoins croissants du secteur.

Parallèlement, l'université de Caen Normandie joue un rôle structurant à l'échelle régionale, en coordonnant le réseau Grand Ouest des Personnes compétentes en radioprotection (PCR). Dans un contexte de développement de l'industrie nucléaire, la formation, la montée en compétences et la mise à jour des connaissances apparaissent plus que jamais



Yves Lemière, enseignant-chercheur en physique nucléaire

essentielles. L'établissement s'inscrit pleinement dans cette dynamique en proposant une offre cohérente et adaptée aux évolutions du secteur.

QUELLES SONT LES PERSPECTIVES À VENIR ?

Cette dynamique se concrétise notamment par la construction d'une halle technologique dédiée à la recherche et à la formation en physique nucléaire. Le site, qui verra le jour à l'horizon 2031, regroupera le laboratoire LPC Caen, des plateaux techniques, des salles d'enseignement ainsi que des espaces mutualisés pour accueillir des partenaires industriels. En sous-sol, un bunker abritera les systèmes d'irradiation, dont un générateur de neutrons. Cette halle technologique, sans équivalent en France, réunira des expertises et équipements en un même lieu pour favoriser les échanges et les collaborations. Soutenu par la Région Normandie, la Communauté urbaine Caen la mer et le Département du Calvados, ce pôle constitue une étape décisive dans la structuration de la filière nucléaire normande.

LPC CAEN • Laboratoire de physique corpusculaire de Caen

UMR 6534 CNRS – université de Caen Normandie – ENSICAEN



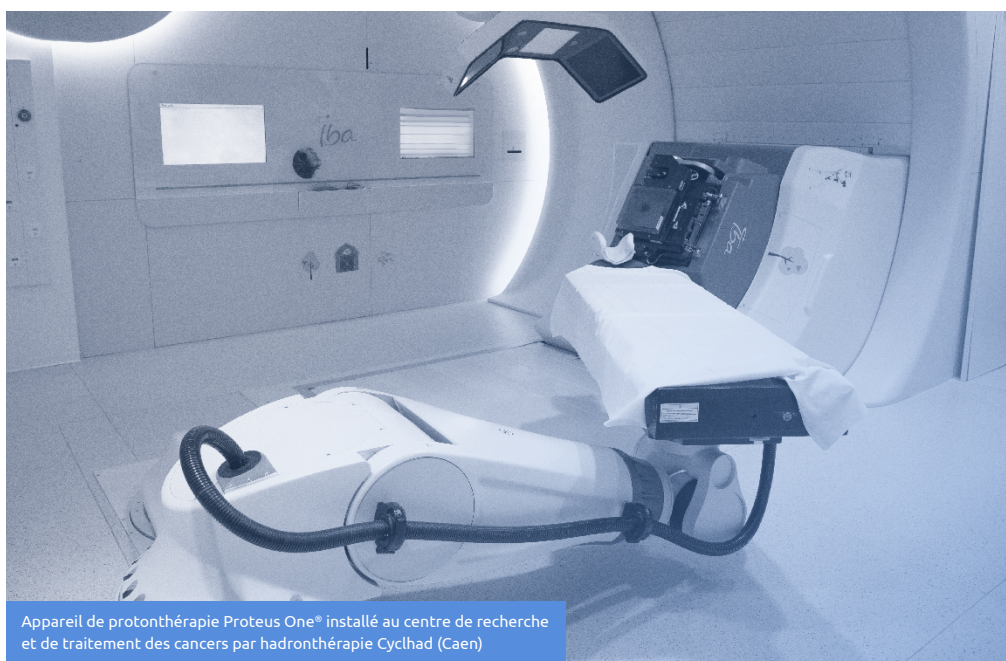
Pour en savoir plus sur la halle technologique nucléaire de Normandie (en vidéo)

LE NUCLÉAIRE, OUTIL DE POINTE POUR LA MÉDECINE

Le nucléaire est au cœur de nouvelles approches thérapeutiques en oncologie, proposant des stratégies plus ciblées et personnalisées. Les recherches en physique nucléaire menées au LPC Caen contribuent au développement de cette médecine de précision.

VERS DE NOUVELLES APPROCHES EN RADIOTHÉRAPIE

Le centre Cyclhad, le centre de lutte contre le cancer François Baclesse et l'université de Caen Normandie développent, avec le soutien de la Région Normandie, une expertise rare en France dans le domaine de l'hadronthérapie. « *Contrairement à la radiothérapie conventionnelle par rayons X, qui utilise des faisceaux de photons pour irradier et détruire les cellules cancéreuses, l'hadronthérapie s'appuie sur des faisceaux de particules lourdes, comme les protons*, explique Marc Rousseau, professeur en physique nucléaire. *Les protons délivrent l'essentiel de leur énergie directement au niveau de la tumeur visée, ce qui permet d'administrer un pic d'irradiation très important tout en préservant les tissus sains adjacents.* » Cette approche sélective, d'une précision millimétrique, se révèle particulièrement indiquée pour traiter des tumeurs résistantes aux traitements conventionnels ou situées à proximité d'organes sensibles. En France, seuls trois centres disposent aujourd'hui de ces équipements de haute technologie – Nice, Orsay et Caen. Le centre Cyclhad, dédié au traitement et à la recherche en hadronthérapie, a accueilli ses premiers patients et patientes en 2018.



Appareil de protonthérapie Proteus One® installé au centre de recherche et de traitement des cancers par hadronthérapie Cyclhad (Caen)

Les travaux en physique nucléaire trouvent ici des applications concrètes. « *Une partie des recherches menées au LPC Caen concerne la mise au point d'instruments capables de contrôler, en temps réel, la bonne administration des traitements : l'objectif est de concevoir des outils de dosimétrie permettant de mesurer avec exactitude les doses de rayonnements reçues* », souligne Marc Rousseau.

En septembre 2025 ont débuté, au centre Cyclhad, les travaux d'installation d'un nouvel accélérateur de particules multi-ions. « *Cet équipement est unique en France : on n'en compte que trois en Europe – en Allemagne, en Italie et en Autriche – et une vingtaine dans le monde.* » Sa mise en service, prévue pour 2028, permettra d'élargir les stratégies thérapeutiques grâce à l'utilisation d'ions carbone et d'ions hélium.

UNE RECHERCHE NOURRIE PAR DES EXPERTISES MULTIPLES

« *Nos travaux visent à développer des dispositifs innovants garantissant l'efficacité, la qualité et la sécurité des traitements – de la planification jusqu'au suivi*, poursuit Marc Rousseau. *Ils s'inscrivent dans une réalité clinique : c'est pourquoi nous travaillons*

en étroite collaboration avec des biologistes, des chimistes et des cliniciens. » Fort de son expertise en physique nucléaire, le LPC Caen est associé aux recherches pré-cliniques en cours pour élaborer de nouveaux protocoles d'irradiation. Ces études sont notamment conduites au GANIL, qui dispose d'une plateforme dédiée à l'irradiation de modèles biologiques. Pour les biologistes, ces études visent à mesurer l'effet des rayonnements sur les cellules tumorales et sur les tissus sains : tout l'enjeu consiste à analyser l'efficacité thérapeutique et à identifier les mécanismes susceptibles d'induire d'éventuels effets secondaires. « *Il s'agit d'évaluer la balance bénéfices-risques, afin de définir les protocoles de soin les plus adaptés.* » Une étape clé pour renforcer le potentiel de ces thérapies innovantes et les rendre toujours plus précises, efficaces et sûres.

**LPC CAEN · Laboratoire de physique
corpusculaire de Caen**

UMR 6534 CNRS – université de Caen Normandie –
ENSICAEN

NUCLÉAIRE : UNE FILIÈRE, DES PARCOURS PROFESSIONNELS MULTIPLES

Gwenaëlle et Sophie sont diplômées du master Physique, parcours Radioprotection de l'université de Caen Normandie. Une formation dédiée au contrôle et à la maîtrise des risques d'exposition aux radiations, qui ouvre des opportunités dans l'industrie comme dans le secteur médical.



GWENAËLLE, INGÉNIEURE EN RADIOPROTECTION ET SÛRETÉ NUCLÉAIRE À NUVIA MILLENIUM

Je suis arrivée à l'université de Caen Normandie en deuxième année de licence Physique, puis j'ai poursuivi avec un master, dans le but de me spécialiser dans la filière nucléaire. Ce secteur propose des solutions pour relever les défis de la transition énergétique ou pour lutter contre les cancers – les implications sont nombreuses pour notre société. En master 2, j'ai choisi la spécialité Radioprotection : elle prépare à la gestion des risques afin d'assurer la sécurité des populations, des travailleurs et de l'environnement face aux radiations. J'ai été recrutée en janvier 2026 par Nuvia Millenium et je travaille actuellement comme prestataire pour Naval Group, à Cherbourg-en-Cotentin : je me suis spécialisée dans la sûreté nucléaire des sous-marins.

Parallèlement, j'ai également rejoint la Team 3NC, lancée dans le cadre du projet Normandie nucléaire, nouvelles compétences (3NC). En tant qu'ambassadrice 3NC, je participe à des salons de l'orientation et à des rencontres sur les métiers du nucléaire pour promouvoir l'offre de formation proposée en Normandie. Nous nous déplaçons partout en France et à l'étranger pour faire rayonner la filière nucléaire normande à l'international. Nous avons ainsi fait un déplacement au Maroc aux côtés de l'Agence de l'orientation et des métiers de Normandie pour rencontrer des élèves de lycées français et pour participer au salon France Avenir à Rabat. L'objectif est d'échanger avec les jeunes, de répondre à leurs questions et de partager notre parcours étudiant. C'est aussi l'occasion de déconstruire les idées reçues autour du nucléaire.

J'envisage également de devenir ambassadrice de l'association Women in Nuclear, qui encourage la mixité dans les métiers du nucléaire et favorise la mise en réseau. Si mon parcours peut susciter des vocations, j'en serais ravie !

SOPHIE, CHARGÉE DE RADIOPROTECTION AU CENTRE FRANÇOIS BACLESSE DE CAEN

J'ai effectué toutes mes études à l'université de Caen Normandie, de la licence au master. En master 2, j'ai choisi le parcours Radioprotection, co-accrédité avec l'Institut national des sciences et techniques nucléaires (INSTN). Cette spécialisation permet de se former aux exigences réglementaires et aux enjeux de sûreté, tout en développant les compétences nécessaires pour garantir un usage sûr et maîtrisé des technologies nucléaires dans toutes les applications du nucléaire civil – recherche, industrie, médecine. J'ai suivi cette formation en alternance : j'étais accueillie dans une PME située à Bayeux, Panttechnik, spécialisée dans les sources d'ions utilisées dans les accélérateurs à particules. L'alternance est un atout majeur : elle offre une expérience concrète et facilite l'adaptation au monde professionnel.

Aujourd'hui, je suis chargée de radioprotection au centre François Baclesse, le centre régional de diagnostic et de traitement des cancers de Caen. J'ai été recrutée dès l'obtention de mon diplôme, il y a un an et demi. Au quotidien, je m'occupe des contrôles techniques réglementaires pour assurer la sécurité des personnels utilisant des rayonnements ionisants. Je participe également à l'évaluation des risques, à la formation des équipes et à la gestion des incidents.



© Centre Baclesse

3NC : L'AVENIR DU NUCLÉAIRE S'ÉCRIT ICI EN NORMANDIE



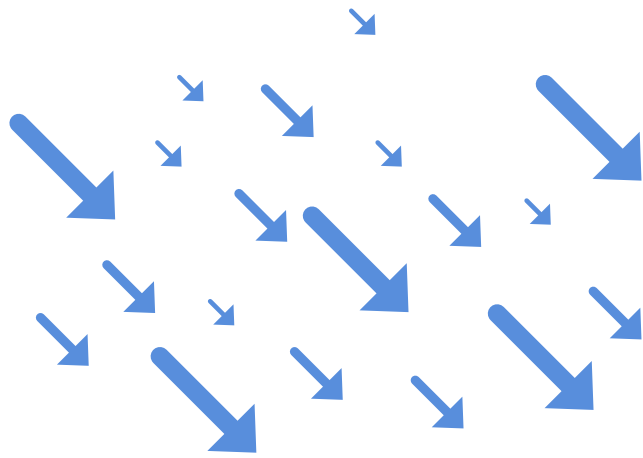
Le projet Normandie nucléaire nouvelles compétences (3NC), porté par la Région Normandie, est lauréat de l'appel à manifestation d'intérêt Compétences et métiers d'avenir. Inscrit dans le plan de relance France 2030, il vise à répondre aux besoins de l'ensemble des métiers de la filière nucléaire. 3NC fédère un

large éventail de partenaires académiques, industriels et institutionnels, avec l'ambition de faire de la Normandie un pôle d'excellence dans ce domaine.

L'université de Caen Normandie y contribue en proposant une offre de formation diversifiée, couvrant tous les niveaux (licence générale, licence

professionnelle, BUT, diplôme d'ingénieur, master, doctorat), accessible en formation initiale comme en alternance, et adossée à des laboratoires de recherche de pointe. La formation qualifiante de Personnes compétentes en radioprotection (PCR) est également proposée aux professionnels du secteur, dans l'ensemble du Grand Ouest : elle se décline en trois niveaux – initial, renforcé et renouvellement.

Dans le cadre de 3NC, l'université de Caen Normandie pilote la massification et la nucléarisation des formations ainsi que des actions de professionnalisation, afin de soutenir le développement de compétences techniques et stratégiques indispensables aux métiers de demain.

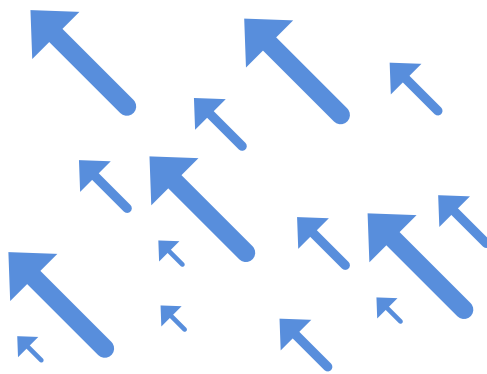


HYDROLIENNE : L'ÉNERGIE VENUE DES COURANTS MARINS

La troisième Programmation pluriannuelle de l'énergie (PPE 3) confirme la place de l'hydrolien dans le mix énergétique français. Cette technologie, qui permet de transformer les courants marins en électricité, s'apprête à franchir une nouvelle étape : la mise en service, d'ici 2030, de la première ferme hydrolienne en France, au large des côtes de la Manche. Anne-Claire Bennis, professeure des universités en hydrodynamique physique et océanographie côtière, et Sylvain Guillou, professeur des universités en mécanique des fluides reviennent sur les enjeux scientifiques du projet FloWatt (axe 2 *TidalRace*).

QUELS SONT LES PRINCIPAUX DÉFIS DERRIÈRE LE DÉVELOPPEMENT D'UNE FILIÈRE HYDROLIENNE DANS LE RAZ BLANCHARD ?

Sylvain Guillou. Le développement de la filière hydrolienne suppose une connaissance fine de l'environnement marin, tant du point de vue physique que biologique. Le raz Blanchard est l'un des courants de marée les plus puissants d'Europe : l'implantation d'hydroliennes implique de prendre en compte les vitesses et les turbulences extrêmes rencontrées dans cette zone, afin d'obtenir un rendement maximum tout en maîtrisant les coûts de maintenance. Les laboratoires M2C et LUSAC accompagnent le projet de développement de la ferme pilote FloWatt dans le raz Blanchard. Nous intervenons sur le volet *TidalRace* : l'objectif est de caractériser l'environnement hydrodynamique, de quantifier le potentiel



hydrolien, de déterminer le positionnement le plus optimal, d'estimer la production d'énergie, mais aussi d'évaluer les impacts environnementaux – sur les courants, le transport sédimentaire et la colonisation biologique (ou biofouling). Ces travaux sont essentiels pour démontrer le potentiel de la filière et la viabilité du projet.

QUELS OUTILS ET MÉTHODES MOBILISEZ-VOUS POUR ÉVALUER UN ENVIRONNEMENT SI COMPLEXE ?

Anne-Claire Bennis. Nos recherches ont débuté il y a maintenant plus de dix ans : elles nécessitent le développement et le déploiement d'instruments de mesure d'une ampleur et d'une capacité inédites, au côté de développements numériques innovants pour aider au dimensionnement des turbines hydroliennes et à l'estimation du productible hydrolien. Des courantomètres ADCP (*acoustic doppler current profiler*) installés en mer, fixés au fond ou tractés derrière un navire océanographique, à différents points du raz Blanchard, sont utilisés afin d'estimer l'énergie générée par les courants de marée en interaction avec les vagues et le vent. Pour obtenir une vision spatialisée, nous avons également implanté sur la côte des radars haute-fréquence à réseaux phasés



Sylvain Guillou est professeur des universités en mécanique des fluides, directeur du laboratoire LUSAC.



Anne-Claire Bennis, professeure des universités en hydrodynamique physique et océanographie côtière au laboratoire M2C.

afin de mesurer les vitesses hydrodynamiques de surface et les états de mer sur la totalité du raz Blanchard. Ces approches sont complémentaires : elles permettent de recueillir des données à la fois verticales – dans la colonne d’eau –, et horizontales – en surface. Dans le projet, elles seront couplées à d’autres techniques, comme les radars en bande X et les satellites de technologie SAR (*synthetic aperture radar*), qui offrent une résolution spatiale encore plus fine. Le projet repose ainsi sur un dispositif innovant combinant mesures *in situ*, télédétection et modélisation numérique. L’ensemble permet de caractériser avec précision la variabilité de la ressource dans cette zone.

QUELLES SONT LES PROCHAINES ÉTAPES DÉSORMAIS ?

Anne-Claire Bennis. Plusieurs prototypes ont déjà été testés avec succès. Une nouvelle phase s’ouvre avec la troisième Programmation pluriannuelle de

l’énergie (PP3), qui initie des perspectives de développement commercial : un premier appel d’offres pour une ferme hydrolienne de 250 MW dans le raz Blanchard devrait être lancé d’ici à 2030. Le projet de ferme pilote FloWatt (axe 1) sera donc pionnier au côté de celui de Normandie Hydrolienne afin de préparer le déploiement à l’échelle commerciale. L’installation de la première tête de série pour la ferme pilote est programmée dès 2028 – avant le déploiement progressif des six turbines.

QUEL REGARD PORTEZ-VOUS SUR CE PROJET ?

Sylvain Guillou. FloWatt s’inscrit dans la continuité de plus de quinze ans de recherches menées dans nos laboratoires. Au fil des projets, nous avons acquis une expertise couvrant toute la chaîne de production d’énergie hydrolienne, à toutes les échelles – celle de l’hydrolienne, pour développer la technologie ; celle de la ferme hydrolienne, pour

analyser les effets de sillage et optimiser l’implantation des turbines ; celle de l’environnement, pour évaluer les impacts sur les écoulements et le transport sédimentaire. Nous approchons aujourd’hui de la phase d’exploitation commerciale : c’est une réelle satisfaction d’avoir contribué au développement de cette filière et à son intégration dans le mix énergétique.

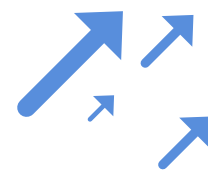
Anne-Claire Bennis. Nos travaux sur les énergies marines renouvelables ont des applications industrielles directes : ce projet a contribué à un transfert de connaissances issues de la recherche fondamentales vers les industriels, avec un impact concret pour la société. En parallèle, ce projet nous a conduits à explorer de nouveaux champs de recherche et à développer des instruments de mesure innovants dédiés à l’étude de l’hydrodynamique si particulière du raz Blanchard. Il a contribué à faire progresser les connaissances fondamentales, avec des retombées significatives pour la communauté scientifique.

FLOWATT : UNE FERME PILOTE DE 17 MW DANS LE RAZ BLANCHARD

FLOWATT La ferme pilote FloWatt sera composée de six hydroliennes à axe vertical, entièrement immergées dans le raz Blanchard (au nord-ouest du Cotentin), où sévit l’un des courants marins les plus puissants au monde. Les turbines, entraînées par la force des courants, produiront de l’électricité, acheminée via un câble sous-marin raccordé au réseau électrique au niveau de la baie d’Écalgrain. D’une puissance de 17 mégawatts, cette ferme pilote devrait être mise en service à l’horizon 2028, pour une durée d’exploitation de 20 ans. L’université de Caen Normandie est partenaire de ce projet porté par Hydroquest et Qair : les scientifiques des laboratoires M2C et LUSAC sont impliqués dans l’axe 2 dénommé *TidalRace*, qui vise à évaluer le potentiel énergétique hydrolien du raz Blanchard en vue d’une exploitation commerciale et durable.

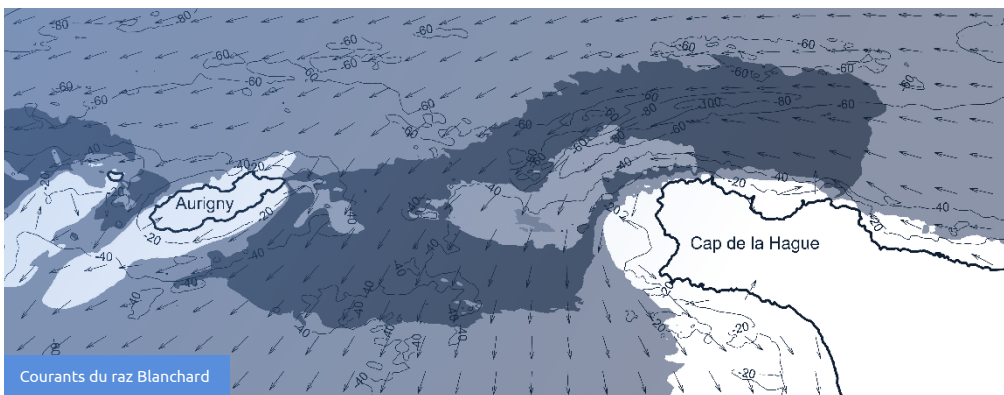
M2C - Morphodynamique continentale et côtière
 UMR 6143 CNRS – université de Caen Normandie – université de Rouen Normandie

LUSAC - Laboratoire universitaire des sciences appliquées de Cherbourg
 UR 4253 université de Caen Normandie



LA MODÉLISATION NUMÉRIQUE ÉCLAIRE LE POTENTIEL DES COURANTS MARINS

Face aux défis de la transition énergétique, les énergies marines renouvelables suscitent un intérêt croissant. Dans le raz Blanchard, balayé par des courants extrêmes, les scientifiques affinent leurs modèles numériques pour décrypter un milieu complexe et évaluer le potentiel réel de l'énergie hydrolienne.



ÉVALUER LE POTENTIEL HYDROLIEN DU RAZ BLANCHARD

Situé dans la Manche, entre le cap de la Hague et l'île d'Aurigny, le raz Blanchard forme un passage étroit et peu profond, où se concentre l'un des courants de marée les plus puissants d'Europe. L'énergie transportée par ces masses d'eau en mouvement représente une ressource majeure d'énergie renouvelable. À tel point que le raz Blanchard est considéré comme l'un des sites les plus prometteurs au monde pour le déploiement d'hydroliennes en mer.

Mais quel est le réel potentiel d'exploitation de ce site ? « C'est précisément l'un des sujets que nous explorons ici, au LUSAC, explique Jérôme Thiébot, professeur des universités en mécanique des fluides. Nous développons des modèles pour comprendre les processus hydrodynamiques d'un milieu aussi complexe que le raz Blanchard. L'objectif est de produire des simulations numériques toujours plus précises, capables de prédire les courants et les variations de hauteurs d'eau en fonction des ondes de marée, des conditions météorologiques et des vagues, pour ainsi caractériser au mieux la ressource disponible. » Pour y parvenir, les scientifiques s'appuient sur des mesures de terrain, obtenues grâce à des courantomètres immergés, des radars haute fréquence ou de l'imagerie vidéo. Autant de données essentielles pour affiner les modèles numériques. « Ce travail repose sur des collaborations avec d'autres laboratoires partenaires, qui collectent des données in situ et mènent des expérimentations en bassin, notamment à partir de maquettes d'hydroliennes. Cette diversité d'approches fait toute la richesse du projet. »

ENTRE POTENTIEL THÉORIQUE ET CONTRAINTES RÉELLES

La puissance maximale disponible dans le raz Blanchard est estimée à 5 GW. « Le potentiel est considérable : c'est l'équivalent de trois réacteurs nucléaires de type EPR, souligne Jérôme Thiébot. Mais ce chiffre correspond à la ressource théorique maximale, selon un scénario dépourvu de toute limite et de toute contrainte. » Or un tel projet doit inévitablement composer avec des contraintes techniques, environnementales et financières. « Les hydroliennes représentent des obstacles qui modifient les écoulements, accélèrent les courants latéraux et influencent le transport des sédiments. Il est donc essentiel de disposer de modèles fiables, capables de prévoir ces effets et d'en mesurer les conséquences dans le temps. En intégrant ces paramètres, on obtient une estimation plus réaliste, comprise entre 0,5 GW et 1 GW : c'est ce qu'on appelle la ressource pratique. » La modélisation numérique permet ainsi de tester différentes configurations afin de déterminer le dimensionnement optimal des hydroliennes, leur nombre et leur emplacement, dans le but de maximiser la production d'énergie. Une étape clé dans la conception des futures fermes hydroliennes.

LA RESSOURCE HYDROLIENNE À L'ÉCHELLE MONDIALE

Grâce à la puissance de ses courants, sa faible profondeur, et sa proximité du littoral, le raz Blanchard cumule les atouts. C'est ici que sera implanté le projet de ferme pilote FloWatt à l'horizon 2028 – dernière étape avant d'envisager une exploitation commerciale. À l'échelle mondiale, les projets restent encore tous

expérimentaux. Les installations les plus avancées ne comptent que quelques turbines, comme la ferme MeyGen, mise en service en 2018 au large de l'Écosse, composée de quatre hydroliennes. Aujourd'hui, la filière reste encore modeste, avec seulement 35 MW de capacité installée dans le monde, principalement au Royaume-Uni et en France – permettant d'alimenter 20 000 foyers environ. Cette capacité devrait augmenter rapidement car de nombreux pays ont commencé des essais en mer afin d'évaluer le potentiel de leurs futures installations. Sur la base des projets en développement, la Commission européenne estime que la capacité hydrolienne pourrait atteindre 8 GW d'ici 2050 – soit de quoi alimenter 12 millions de foyers environ. « La technologie est encore récente : de nombreux défis restent à relever avant un déploiement à grande échelle. Cependant les prototypes déjà testés ont fait leurs preuves, ce qui permet de se projeter vers l'avenir ».

Cette capacité pourrait s'élever à 120 GW à l'échelle mondiale. « 426 sites répartis dans 19 pays, présentent des conditions favorables au développement de l'énergie hydrolienne, poursuit Jérôme Thiébot. Mais les méthodes d'estimation de la ressource pratique varient fortement d'une étude à l'autre, ce qui rend les comparaisons difficiles. Le Royaume-Uni, l'Indonésie et la Nouvelle-Zélande présentent les ressources hydroliennes les plus prometteuses pour contribuer à la production nationale d'électricité. En France, au Canada, aux États-Unis et en Chine, le potentiel est significatif, permettant d'envisager un développement rapide de la filière. »

POUR ALLER PLUS LOIN

-  Daniel S. Coles, et al.; *A review of global tidal stream energy resources*. Proc. A 1 December 2025; 481 (2328): 20240841

LUSAC · Laboratoire universitaire des sciences appliquées de Cherbourg

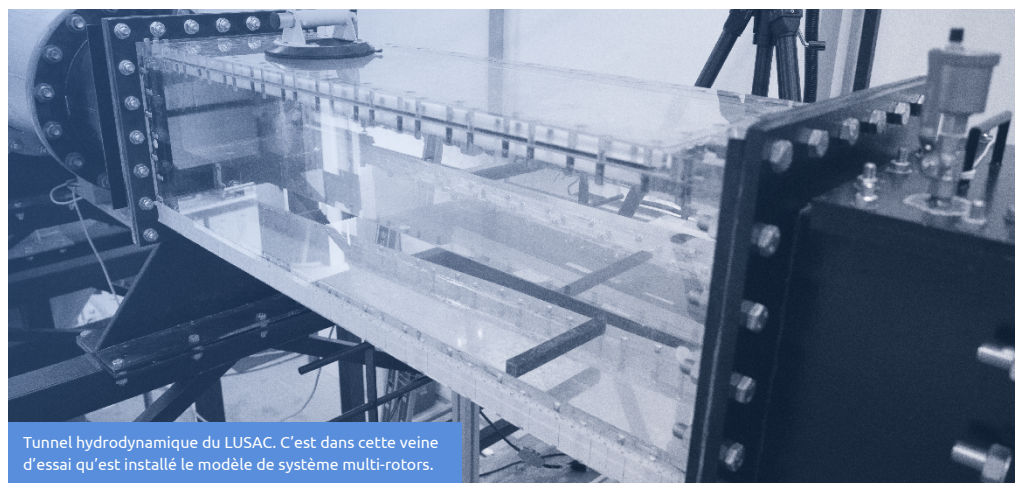
UR 4253 université de Caen Normandie

COMPRENDRE LES MOUVEMENTS DE LA MER : L'APPROCHE EXPÉRIMENTALE

Encore en phase d'expérimentation, la technologie hydrolienne affiche des résultats encourageants. En France, au Royaume-Uni et au Canada, de nombreux démonstrateurs aux configurations variées – axe horizontal ou vertical, immergés ou flottants – sont aujourd'hui testés. Depuis plus de quinze ans, le LUSAC accompagne le développement de cette filière prometteuse, en s'appuyant notamment sur un dispositif expérimental dédié à l'étude des phénomènes hydrodynamiques.

LES VARIATIONS DE L'ÉCOULEMENT MARIN

L'énergie hydrolienne présente un avantage majeur : elle est quantifiable et prédictible car directement liées aux cycles réguliers des marées. Elle permet donc une planification efficace de la production énergétique. Reste que les performances des turbines dépendent de nombreux paramètres. Les variations d'écoulement, dues aux vagues, aux courants et à la nature des fonds marins, jouent un rôle déterminant. À cela s'ajoutent les perturbations générées par les hydroliennes elles-mêmes : les turbines créent un ralentissement de l'écoulement susceptible de provoquer un effet de blocage – surtout si elles sont présentes en trop grand nombre. Dans ce contexte, mieux caractériser les écoulements et estimer les efforts exercés sur les turbines sont essentiels pour dimensionner efficacement les fermes hydroliennes. « Les prototypes d'hydroliennes en cours de développement reposent sur des concepts variés, adaptés aux environnements marins dans lesquels ils sont déployés, explique Alina Santa Cruz, maître de conférences en mécanique. On trouve ainsi des hydroliennes mono-turbines de grande taille, à axe vertical, installées sur les fonds marins – comme celles actuellement développées dans le cadre du projet FloWatt (voir page 8/9). Il y a aussi des plateformes flottantes portant des systèmes multi-rotors à axe horizontal : ces dernières sont actuellement testées dans des sites écossais et canadiens à forts courants de marée. » Ces systèmes multi-rotors se révèlent particulièrement sensibles



Tunnel hydrodynamique du LUSAC. C'est dans cette veine d'essai qu'est installé le modèle de système multi-rotors.

au blocage de l'écoulement, en raison de la proximité latérale des rotors. Une problématique encore peu explorée, qui intéresse particulièrement le LUSAC. Une thèse préparée par Lucien Jouenne, financée par la Communauté d'agglomération du Cotentin et la Région Normandie, est consacrée à ces effets de blocage dans le fonctionnement des hydroliennes marines de type systèmes multi-rotors.

UN TUNNEL HYDRODYNAMIQUE POUR TESTER LES ÉCOULEMENTS EN LABORATOIRE

Le LUSAC développe cette approche expérimentale depuis 2016. « Le tunnel hydrodynamique dispose d'une zone d'étude longue de 1,5 m dans laquelle nous générons des écoulements pouvant atteindre 3 m par

seconde, précise Alina Santa Cruz. Il est équipé de deux moyens de métrologie ou mesure : un pont de mesure des déformations par extensométrie et un système de vélocimétrie par images de particules. » Ce dispositif permet de simuler et de mesurer les effets de la complexité des fonds marins sur les écoulements. « Les fonds marins sont loin d'être lisses ! Les reliefs rocheux génèrent des tourbillons qui peuvent altérer le comportement des hydroliennes, tant en termes de production d'énergie que de fatigue structurelle. » Pour la première fois, ce tunnel hydrodynamique sera au cœur d'un travail de thèse : il servira à caractériser la dynamique des écoulements et à évaluer les chargements hydrodynamiques sur un modèle réduit de système multi-rotors à axe horizontal. Les résultats attendus devraient contribuer à une meilleure compréhension des mécanismes physiques en jeu, notamment ceux liés aux phénomènes de blocage et d'accélération des flux entre les rotors. « Les données expérimentales issues de ce projet aideront à optimiser les systèmes de captage de l'énergie des courants de marée et, in fine, à renforcer la place de l'hydrolien dans le mix énergétique. »

LE PROJET MULTI ROTORS, SOUTENU PAR LA FONDATION 1432

Fondation 1432
UNIVERSITÉ DE CAEN NORMANDIE

La Fondation 1432 accompagne l'université de Caen Normandie dans sa trajectoire de développement au service de la réussite étudiante, la recherche et l'innovation, la transmission de la culture scientifique et la valorisation du patrimoine universitaire. Elle renforce les liens entre la formation, la recherche et le monde socio-économique, en mobilisant ses partenaires autour de projets porteurs de valeurs de développement durable et de responsabilité sociétale. Le projet MULTI ROTORS s'inscrit dans cette dynamique : sélectionné à l'issue d'un appel à projets, il bénéficie d'une enveloppe de 17 000 € pour soutenir l'étude expérimentale sur le fonctionnement des hydroliennes marines de type systèmes multi rotors.

LUSAC · Laboratoire universitaire des sciences
appliquées de Cherbourg

UR 4253 université de Caen Normandie

ÉOLIENNES EN MER : QUEL IMPACT SUR LES ÉCOSYSTÈMES ?

Les éoliennes en mer, comme tout projet d'exploitation des énergies marines, exercent des pressions sur les écosystèmes marins et côtiers. Le laboratoire M2C développe des outils de modélisation pour évaluer et prédire les impacts environnementaux – des outils indispensables pour une gestion durable des ressources.

CONCILIER PRÉSERVATION DES ÉCOSYSTÈMES ET EXPLOITATION DES RESSOURCES MARINES : UN PARADOXE ?

Les écosystèmes marins et côtiers sont des milieux à la fois complexes et fragiles, soumis à de nombreuses pressions. Changement climatique, activités portuaires et touristiques, développement des énergies marines renouvelables, pollution, pêche... Ces pressions s'entrecroisent et se cumulent, produisant des effets variés. « Le développement des énergies marines renouvelables a des effets sur le fonctionnement des écosystèmes qui peuvent être temporaires ou permanents, positifs ou négatifs », explique Nathalie Niquil, directrice de recherche CNRS en écologie marine. *Les comprendre et les anticiper est essentiel pour préserver le bon fonctionnement des écosystèmes.*

Les énergies marines renouvelables ont un intérêt stratégique pour atteindre l'objectif de neutralité carbone. Parmi elles, l'éolien en mer est aujourd'hui la technologie la plus mature : depuis 2022, quatre parcs offshore ont été mis en service en France, dont celui de Fécamp, en Seine-Maritime. Au large des côtes normandes, un second parc est actuellement en construction à Courseulles-sur-mer, dans le Calvados.

Dans ce contexte, une question s'impose : le respect de la biodiversité est-il compatible avec le développement de projets industriels toujours plus ambitieux ? « Le déploiement des éoliennes peut effectivement modifier le fonctionnement naturel des écosystèmes. Nous sommes face à un paradoxe : les solutions qui contribuent à la transition énergétique

peuvent entrer en tension avec celles qui favorisent la préservation des milieux. » Pour y répondre, les directives européennes imposent de veiller au "bon état écologique" du milieu marin. Mais que recouvre exactement cette notion ? « C'est une question cruciale. Le "bon état écologique" correspond-il nécessairement à l'état d'origine ? L'artificialisation engendrée par l'installation d'éoliennes en mer est-elle incompatible avec ce "bon état écologique" ? Ou peut-elle, au contraire, y contribuer ? Ces réflexions nous interrogent, en tant qu'écologues, et interrogent plus largement notre rapport à la nature. »

DES OUTILS DE MODÉLISATION POUR MIEUX COMPRENDRE LES IMPACTS CUMULÉS

Le laboratoire M2C développe des outils de modélisation capables d'évaluer ces impacts environnementaux. Les recherches se concentrent notamment sur le benthos – ces organismes vivant sur les fonds marins ou fixés à des substrats immergés, qu'il s'agisse de rochers ou... de mâts d'éoliennes. « Les espèces dont l'habitat naturel est rocheux vont coloniser ces structures et former des récifs artificiels – ce qui aura pour effet d'attirer d'autres espèces, puis d'autres encore », poursuit Nathalie Niquil. *Ces dynamiques en cascade modifient le réseau trophique, entraînant des changements à l'échelle de l'écosystème. Cette artificialisation, qui peut être perçue comme négative du fait que l'écosystème est modifié, peut aussi présenter un intérêt en favorisant la productivité.*

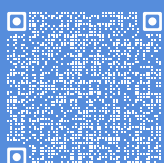
Car le benthos constitue une ressource alimentaire pour de nombreuses espèces. Observer le réseau



Nathalie Niquil,
directrice de
recherche CNRS
en écologie marine

trophique – ou, autrement dit, les relations entre proies et prédateurs – permet ainsi d'évaluer l'état de santé des écosystèmes. Et cela passe par des études de terrain combinées à des outils de modélisation mathématique. « Les scientifiques collectent en mer des données sur les espèces, leur abondance, leur taille etc. Nous intégrons ces données dans des modèles qui reconstituent le fonctionnement du réseau alimentaire à l'échelle de l'écosystème. » Ces outils permettent d'analyser les éventuels impacts cumulés des parcs éoliens en mer, du changement climatique et des activités humaines. Mais aussi de simuler différents scénarios : multiplication des éoliennes, installation de plusieurs parcs dans une même zone, changement d'aire de répartition des espèces en lien avec le réchauffement des eaux, extraction de granulats des fonds marins. « Les effets ne s'additionnent pas nécessairement : ils peuvent se renforcer ou, au contraire, se compenser », précise Nathalie Niquil. Mieux comprendre ces interactions est essentiel pour appréhender les enjeux locaux et régionaux, et formuler des recommandations en faveur d'une exploitation durable des ressources marines.

PROJET NESTORE (2022-2025) : DÉVELOPPER DES OUTILS ADAPTÉS POUR ÉTUDIER LE CUMUL D'IMPACTS POTENTIEL DES PARCS EMR ET DES AUTRES ACTIVITÉS HUMAINES SUR LE FONCTIONNEMENT DES ÉCOSYSTÈMES MARINS



Retrouver
le webinaire

Le projet NESTORE, piloté par l'université de Caen Normandie et France Énergies Marines, arrive à son terme. Ce projet avait pour objectif de mettre au point des outils de modélisation écosystémique en échelles imbriquées, afin de faciliter l'évaluation des impacts cumulés dans le cadre du développement des énergies marines renouvelables. Le 26 mai 2026, le webinaire final (disponible en replay) a présenté les principales conclusions du projet.

M2C - Morphodynamique continentale et côtière

UMR 6143 CNRS – université de Caen Normandie
– université de Rouen Normandie

PROTÉGER LES ZONES CÔTIÈRES FACE À L'ASSAUT DES VAGUES

Athavan Rasenthiram prépare une thèse en génie côtier au laboratoire M2C et à Builders École d'ingénieurs. Ses recherches contribuent au développement de récifs artificiels conçus à partir de matériaux naturels pour mieux protéger les littoraux face à l'érosion côtière.

QUELLES ONT ÉTÉ LES ÉTAPES CLÉS DE VOTRE PARCOURS AVANT CETTE THÈSE ?

Je suis né au Sri Lanka, où j'ai effectué toute ma scolarité jusqu'au lycée. J'ai ensuite poursuivi des études supérieures en génie civil en Inde, grâce à une bourse du gouvernement indien. De retour dans mon pays natal, j'ai enseigné quelques années à l'université de Jaffna, au sein du département des techniques de l'ingénieur. Souhaitant approfondir les enjeux liés à l'industrie maritime, j'ai découvert le master Erasmus Mundus CoMEM+, qui s'apprêtait alors à ouvrir. J'ai candidaté et eu la chance d'intégrer la toute première promotion. J'ai passé la première année de master en Norvège et en Espagne, avant de rejoindre Caen en deuxième année. J'ai ensuite réalisé mon mémoire de master sous la direction du professeur Dominique Mouazé. Mes travaux portaient sur le comportement hydrodynamique d'un nouveau type de brise-lame flottant destiné à atténuer le déferlement des vagues et à lutter contre l'érosion côtière. Aujourd'hui je poursuis ces recherches au laboratoire M2C et à Builders dans le cadre de ma thèse de doctorat.

QUELS SONT LES ENJEUX DE VOS RECHERCHES ?

Mes recherches visent à concevoir un système de récif artificiel capable de réduire l'énergie des vagues dans les zones soumises à de forts courants de marée. L'objectif est de proposer une solution d'ingénierie conciliant protection du littoral côtier, préservation de la biodiversité et attractivité touristique. Nous développons ainsi des unités modulaires préfabriquées, faciles à installer. Les matériaux utilisés sont principalement d'origine naturelle et ne contiennent pas de béton, afin de limiter les émissions de carbone. Entièrement immergé, ce système de récif modulaire présente une structure poreuse destinée à favoriser la création de nouveaux habitats pour les organismes marins. Le projet cherche à répondre aux contraintes des zones à forte marée, caractéristiques de la Normandie, grâce à des structures capables de fonctionner aussi bien à marée haute qu'à marée basse. J'ai eu l'occasion de présenter ces recherches lors du Challenge Starthèse 2025, organisé par Pépite Normandie. Cette présentation m'a valu le prix de la créativité – une reconnaissance encourageante du potentiel d'impact de nos travaux.

À QUOI RESSEMBLE UNE JOURNÉE TYPE AU LABORATOIRE ?

Une grande partie de mes journées est consacrée à la planification et à la conduite d'expériences dans les canaux à houle du laboratoire M2C et de Builders. Cet outil d'ingénierie côtière est essentiel car il permet d'évaluer et de mesurer les effets de la houle sur nos modules artificiels. L'objectif est de reproduire différentes conditions maritimes – niveau d'eau, hauteur des vagues ou intensité des courants – puis d'immerger nos modules expérimentaux afin d'observer leurs comportements. L'utilisation des deux canaux permet de travailler à différentes échelles : si les résultats obtenus sont cohérents d'un canal à l'autre, cela renforce la validité de nos conclusions. Nous avons déjà réalisé une première série de tests très encourageants. Une seconde campagne d'expérimentation est en préparation, avec différentes géométries de modules, afin d'identifier la configuration la plus efficace pour stabiliser les structures.

M2C - Morphodynamique continentale et côtière

UMR 6143 CNRS – université de Caen Normandie
– université de Rouen Normandie

ZOOM SUR COMEM+, LE MASTER OF SCIENCE IN COASTAL AND MARINE ENGINEERING AND MANAGEMENT

Le Master of Science COMEM+ est un programme conjoint Erasmus Mundus de deux ans, coordonné par l'université des sciences et technologies de Norvège (NTNU). Ce cursus d'excellence forme des ingénieurs capables de relever les grands défis environnementaux, techniques et sociétaux liés aux zones maritimes et côtières. Trois parcours sont proposés : Ports et voies navigables du futur ; Génie de l'environnement côtier ; Gestion du littoral. Les étudiants et étudiantes effectuent deux semestres en mobilité dans l'un des établissements partenaires : l'université de Gênes (Italie), l'université polytechnique de Catalogne (Espagne), Builders École d'ingénieurs (France), et l'université de Caen Normandie, où la formation est adossée au master Gestion de l'environnement, parcours Ingénierie et géosciences du littoral (IGL). Le programme s'appuie sur l'expertise scientifique du laboratoire M2C, dont l'un des axes de recherche est le développement de systèmes de protection côtière. La Normandie est en effet particulièrement exposée aux risques de submersion marine en raison de l'étendue de son littoral. « Notre objectif est de développer et d'expérimenter des solutions d'ingénierie côtière adaptées aux spécificités du littoral normand, explique

Dominique Mouazé, enseignant-chercheur en génie côtier et responsable du master Gestion de l'environnement. *Nous concevons notamment des blocs artificiels destinés à protéger les zones côtières contre les fortes houles de tempête. En 2021, ces blocs en béton ont été installés sur deux sites pilotes, à Ouistreham et à Cherbourg-en-Cotentin, afin d'évaluer leur efficacité en matière de protection côtière, mais aussi leur capacité à servir de support à la biodiversité marine. Parallèlement, nous développons des récifs modulaires immergés, capables de s'adapter à différentes hauteurs d'eau, car les côtes normandes se caractérisent par un marnage très important. L'objectif est que ces récifs artificiels deviennent de véritables habitats pour la biodiversité marine. Plus largement, ces solutions d'ingénierie visent à renforcer la résilience des territoires face au changement climatique, en intégrant des dimensions à la fois environnementales et sociétales. »*



VERS UNE NOUVELLE GÉNÉRATION DE PANNEAUX SOLAIRES ?

La production d'électricité par l'effet photovoltaïque connaît une forte progression en France comme dans le reste du monde. Alors que la demande mondiale explose et que les tensions sur les matières premières se multiplient, la recherche explore de nouvelles pistes pour améliorer les performances des cellules solaires tout en réduisant leur coût et leur impact environnemental. L'Institut Carmen mise, depuis 2015, sur une voie prometteuse : les cellules solaires organiques. Explications avec Cyprien Lemouchi, maître de conférences en chimie organique.

POURQUOI S'INTÉRESSER AUX CELLULES SOLAIRES ORGANIQUES ?

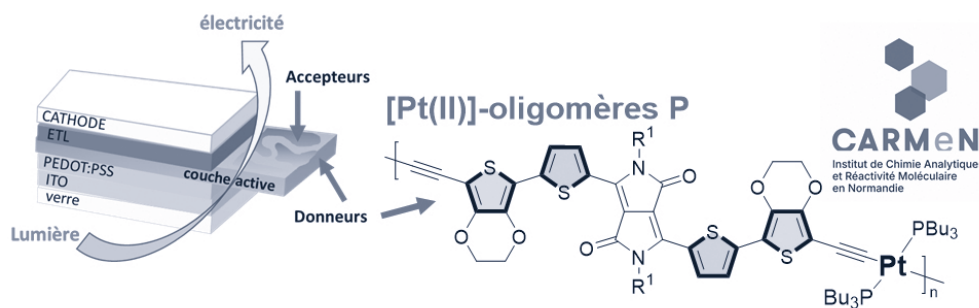
Les cellules qui composent les panneaux solaires sont constituées de plusieurs couches minces. Parmi elles, la couche dite "active" joue un rôle central. Elle est le mélange entre deux types de molécules : les donneurs et les accepteurs. C'est elle qui transforme l'énergie lumineuse en électricité. Aujourd'hui, les cellules solaires les plus performantes affichent des rendements de photoconversion supérieurs à 40 %.

Mais ces technologies reposent le plus souvent sur l'utilisation de métaux rares et/ou toxiques comme l'arsenic, le gallium ou l'indium. Ici, à l'Institut CARMEN, nous cherchons à développer des cellules solaires organiques. L'objectif est de synthétiser des semi-conducteurs de type donneurs sous forme de molécules organiques – composées donc principalement d'atomes de carbone –, qui entreront dans la fabrication des couches actives. Ces matériaux présentent plusieurs avantages : ils peuvent être produits localement, ils sont plus malléables, moins fragiles que les panneaux commercialisés composés en silicium et plus faciles à recycler. Ces molécules peuvent être appliquées sur de grandes surfaces comme des peintures. Une perspective particulièrement intéressante dans le contexte géopolitique actuel, où les questions d'indépendance technologique et de souveraineté énergétique deviennent stratégiques.

Reste toutefois un obstacle majeur : le rendement maximal des cellules solaires organiques plafonne aujourd'hui à 20 %. Des performances encore insuffisantes pour envisager une commercialisation.

TOUT L'ENJEU CONSISTE À AMÉLIORER CES PERFORMANCES ?

Oui, plusieurs stratégies sont actuellement explorées à l'échelle internationale pour lever ce verrou technologique. Ce domaine est très compétitif et impose une veille scientifique constante pour rester à la pointe des dernières technologies et pour prendre les virages



au bon moment – car ces stratégies sont longues à mettre en place et demandent des investissements de long terme.

Nous travaillons sur des molécules dites "conjugées", caractérisées par une alternance de liaisons simples et doubles : c'est cette architecture moléculaire spécifique qui confère à la couche active ses propriétés de conversion de la lumière en électricité. Nos travaux consistent à modifier la structure de ces molécules afin d'optimiser les propriétés du matériau : ils nécessitent donc une collaboration étroite entre physiciens et chimistes pour sélectionner les molécules à développer et évaluer leurs performances. Une fois les architectures moléculaires les plus prometteuses identifiées, un autre défi apparaît : mettre au point des procédés permettant leur synthèse à grande échelle.

OÙ EN ÊTES-VOUS AUJOURD'HUI ?

La complémentarité entre mes compétences en chimie organique pour la préparation des matériaux organiques pour l'électronique et celles en caractérisation des macromolécules du Pr. Loïc Le Pluart nous a permis, depuis 2015, de développer, avec l'aide de plusieurs doctorants et post doctorants, des matériaux hybrides associant des polymères conjugués à un métal – le platine. Au fil des projets, nous avons augmenté petit à petit le rendement de photoconversion de cette stratégie pour atteindre un maximum de 16 %. Ces résultats ont été récemment publiés dans la revue scientifique *Solar RRL*, dédiée à l'énergie solaire – une publication qui a donné une

visibilité internationale à nos travaux. Ces résultats ouvrent la voie à de nouvelles stratégies pour augmenter les performances des cellules mais aussi pour remplacer le platine par des métaux moins coûteux. Deux pistes sont actuellement explorées dans le cadre d'une thèse et d'un post-doctorat, avec l'objectif de dépasser les 16 %, voire de franchir le seuil des 20 % – l'enjeu étant de trouver le meilleur compromis entre rendement, coût de production, recyclabilité et toxicité des matériaux.

Nos recherches s'appuient sur un réseau de collaborations nationales et internationales – avec l'Italie, le Canada et l'Inde, notamment. Ces collaborations sont indispensables : travailler isolément serait contre-productif dans le contexte actuel. Un nouveau projet vient par ailleurs d'être déposé avec l'université de Sherbrooke (Canada) pour explorer une nouvelle gamme de molécules et ainsi anticiper les futures évolutions technologiques, au plus près des attentes sociétales.

POUR ALLER PLUS LOIN
Abdel Aziz Wayzani, et al.;
A Platinum (II) Polyene Oligomers Donor for Efficient Ternary Organic Solar Cells.
Solar RRL 2026, 10.

CARMEN - Institut de chimie analytique et réactivité moléculaire en Normandie

UMR 6064 CNRS – université de Caen Normandie – université de Rouen Normandie – ENSICAEN – INSA Rouen Normandie

ÉNERGIE SOLAIRE : LES PROMESSES DES MATÉRIAUX PÉROVSKITES

L'oxyde d'indium-étain est un composé indispensable à l'industrie de l'électronique, utilisé notamment dans les téléphones portables et les panneaux photovoltaïques. Problème : face à l'explosion de la demande mondiale, l'indium se raréfie... et les prix s'envolent. La solution pourrait venir des matériaux pérovskites, que le CRISMAT explore depuis plus de 40 ans.

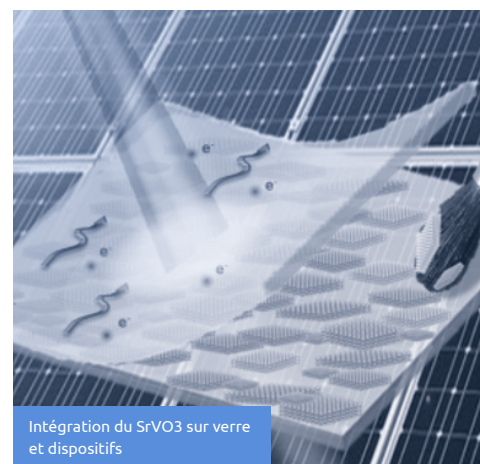
LE COÛT DE L'INDIUM FRAGILISE L'INDUSTRIE DE L'ÉLECTRONIQUE

Le point commun entre les cellules photovoltaïques et les écrans de nos tablettes, GPS et téléphones ? Les TCO, ou oxydes transparents conducteurs. Ces couches minces, essentielles au fonctionnement des écrans tactiles comme des panneaux solaires, combinent deux propriétés clés : la transparence, qui permet le passage de la lumière, et la conductivité, nécessaire au transport des charges électriques. « Ces matériaux sont généralement fabriqués à partir d'oxyde d'indium-étain, indique Arnaud Fouchet, chargé de recherche au CNRS. Or l'indium, principalement produit en Chine, devient une ressource de plus en plus rare, et donc de plus en plus coûteuse. Il est urgent de trouver une alternative

afin de développer une filière de fabrication de TCO en France et en Europe. » L'essor des énergies renouvelables, et plus particulièrement du solaire, accentue encore cette pression sur les approvisionnements. Mais par quoi remplacer l'oxyde d'indium-étain ? Le CRISMAT s'intéresse notamment aux matériaux dits "pérovskites". « L'intérêt de cette grande famille de matériaux réside dans la diversité de leurs propriétés : certains sont métalliques, d'autres ferroélectriques, conducteurs, supraconducteurs, transparents, résistants, isolants... En jouant sur certains éléments chimiques – notamment le strontium, le vanadium, le calcium, le niobium et le molybdène –, nous pouvons ajuster ces propriétés afin d'obtenir des performances comparables, voire supérieures, à celles de l'oxyde d'indium-étain. »

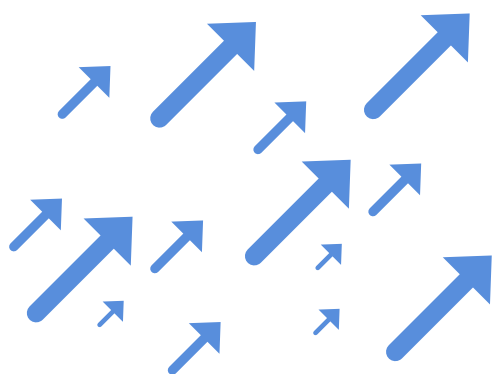
LA PISTE DU VANADATE DE STRONTIUM

Le vanadate de strontium (SrVO3) apparaît aujourd'hui comme l'une des pistes les plus prometteuses : il combine en effet les très recherchées propriétés de transparence et de conductivité. L'équipe Film Interfaces Surfaces étudie ce matériau depuis 2019 : quatre ans plus tard, en 2023, le CRISMAT a rejoint un consortium national dans le cadre du Programme et équipement prioritaire de recherche Systèmes énergétiques & énergies renouvelables (PEPR TASE), incluant l'institut national de l'énergie



Intégration du SrVO3 sur verre et dispositifs

solaire du Commissariat à l'énergie atomique (CEA), afin de développer de nouveaux procédés transférables à l'industrie. « L'objectif est désormais de mettre au point un procédé efficace permettant de déposer des couches minces de vanadate de strontium sur du verre et dans des dispositifs, précise Arnaud Fouchet. Contrairement à l'oxyde d'indium-étain, le vanadate de strontium ne peut pas être déposé à température ambiante. Ce matériau doit être cristallisé pour obtenir les performances attendues : il doit être chauffé à une température avoisinant les 500°C. » Or les cellules solaires sont sensibles à la chaleur : tout l'enjeu consiste donc à déposer ce nouveau matériau à la température la plus basse possible afin de ne pas dégrader les cellules photovoltaïques. Les recherches se poursuivent afin de développer de nouveaux procédés permettant de réduire la dépendance aux matériaux rares – et ainsi rendre, à terme, les équipements électroniques et photovoltaïques plus accessibles et moins coûteux.



LE PROJET SVO2MAT PRÉPARE L'INDUSTRIALISATION DU VANADATE DE STRONTIUM

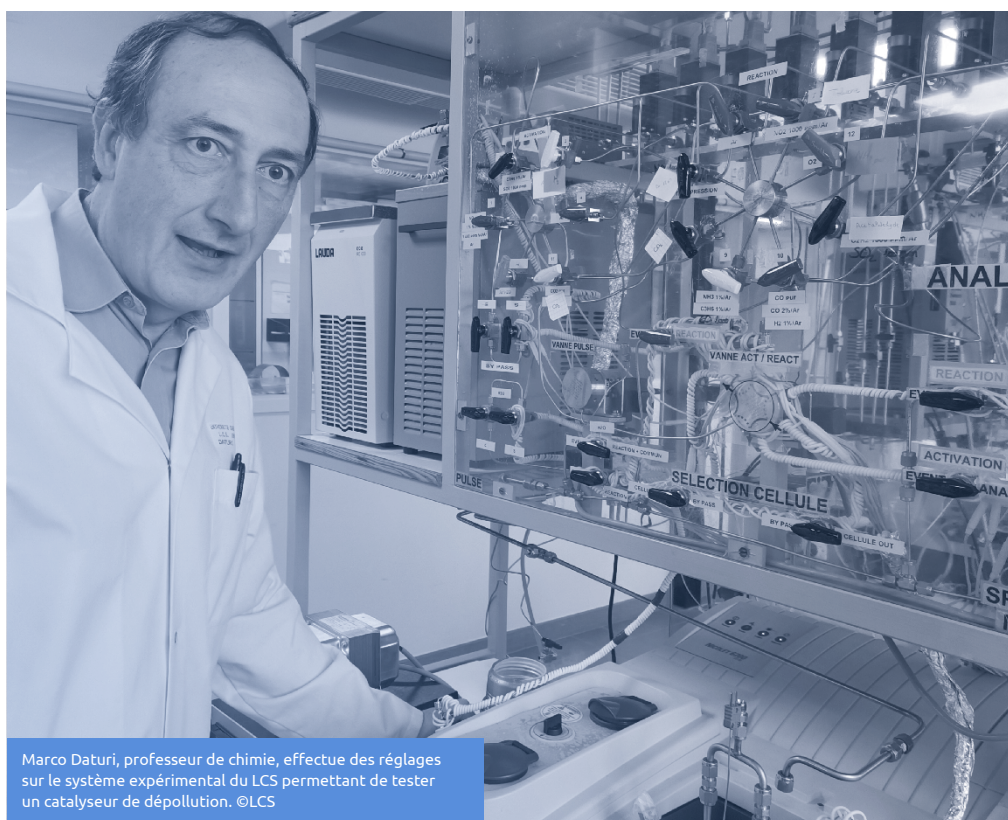
L'entreprise normande Codex International s'engage aux côtés du Laboratoire de cristallographie et sciences des matériaux (CRISMAT) et du Centre de recherche sur les ions, les matériaux et la photonique (CIMAP) afin d'accélérer le transfert du vanadate de strontium (SrVO3). Le projet, nommé SVO2Mat, bénéficie du soutien de la Région Normandie : il doit permettre d'évaluer les performances du SrVO3 comme substitut à l'oxyde d'indium-étain et d'explorer les applications possibles auprès de différents secteurs industriels. Le photovoltaïque, les semi-conducteurs, la photonique ou les smart windows figurent parmi les secteurs visés. Ce nouveau matériau à base de strontium constitue une alternative innovante pour répondre aux enjeux technologiques et environnementaux de demain. Les membres du projet espèrent une industrialisation dans les deux prochaines années. À suivre !

CRISMAT · Laboratoire de cristallographie et sciences des matériaux

UMR 6508 CNRS – université de Caen Normandie
– ENSICAEN

TRANSITION ÉNERGÉTIQUE : LES DÉFIS DE LA NEUTRALITÉ CARBONE

La France s'est fixé un objectif ambitieux : atteindre la neutralité carbone d'ici 2050. Concrètement, les émissions de CO₂ devront être compensées par les puits naturels, comme les forêts et les océans, mais aussi par des technologies capables de capter et stocker le carbone. Dans cette perspective, le LCS mène des recherches consacrées notamment à l'élimination des polluants et à la capture du dioxyde de carbone. Éclairage avec Marco Daturi, professeur de chimie.



Marco Daturi, professeur de chimie, effectue des réglages sur le système expérimental du LCS permettant de tester un catalyseur de dépollution. ©LCS

L'ENVIRONNEMENT ET L'ÉNERGIE AU CŒUR DES RECHERCHES

« Malgré l'essor des énergies renouvelables, les combustibles fossiles représentent encore près de 80 % de l'énergie consommée dans le monde. Il est donc bien difficile de s'en passer à l'heure actuelle. Nos recherches s'inscrivent, depuis près de quarante ans, dans les domaines de l'environnement et de l'énergie : nos travaux se concentrent principalement sur les secteurs du transport et de l'industrie, qui figurent parmi les plus importants émetteurs de CO₂. L'objectif est de réduire l'empreinte carbone : cela passe par le développement de stratégies permettant de filtrer les gaz toxiques produits par les moteurs, d'éliminer les polluants et de capturer le CO₂. L'enjeu principal est de trouver un équilibre entre le coût, l'efficacité et l'impact environnemental. Nous essayons de développer des procédés performants, durables et économiquement viables, sans générer d'effets négatifs sur les écosystèmes. »

UNE RECHERCHE FONDAMENTALE EN LIEN ÉTROIT AVEC L'INDUSTRIE

« Les travaux menés au LCS relèvent avant tout de la recherche fondamentale : il s'agit de préparer les matériaux, d'étudier leurs propriétés, d'identifier les mécanismes de réaction et d'optimiser leurs performances. Nos recherches ont permis des avancées concrètes, notamment dans l'industrie automobile avec l'optimisation des pots catalytiques, ou encore dans le domaine de la qualité de l'air intérieur grâce au développement de nouveaux matériaux poreux hybrides. Le laboratoire collabore étroitement avec les entreprises, avec l'appui de la cellule de valorisation LCS Valoris, qui propose un accompagnement autour de problématiques industrielles. Ces collaborations sont essentielles car elles nous permettent de mieux comprendre les besoins et les contraintes des industriels afin de rendre nos recherches transférables. Elles nous

permettent aussi d'améliorer la compréhension scientifique tout en offrant des applications concrètes pour l'industrie et la société, avec un impact majeur sur les technologies durables. Cette démarche favorise également l'innovation : le laboratoire a ainsi déposé plusieurs brevets portant sur la synthèse de matériaux capables de capturer, purifier et stocker les polluants, ainsi que sur le développement de procédés destinés aux secteurs automobile et pétrolier. »

HYDROGÈNE, BIOMASSE : EXPLORER DE NOUVEAUX VECTEURS ÉNERGÉTIQUES

« Ces dernières années, nos recherches se sont également orientées vers le mix énergétique. Nous travaillons notamment sur la valorisation de la biomasse pour produire des carburants de synthèse. Nous explorons également de nouvelles pistes pour produire de l'hydrogène en utilisant l'électricité issue des panneaux solaires : nous cherchons à utiliser le rayonnement solaire pour extraire l'hydrogène de l'eau, au moyen de catalyseurs. Aujourd'hui, la quasi-totalité de l'hydrogène produit dans le monde provient encore du gaz naturel, via le reformage des hydrocarbures, un procédé fortement émetteur de CO₂. Nous commençons à obtenir des résultats intéressants, mais cela reste un défi technologique majeur. Nous travaillons aux côtés de partenaires français et européens afin de tester la mise en application de ces solutions. Avant d'envisager, à terme, un déploiement à grande échelle. »

LCS - Laboratoire Catalyse & Spectrochimie

UMR 6506 CNRS – université de Caen Normandie – ENSICAEN

Directeur de publication : Lamri Adoui - Président de l'université de Caen Normandie | Coordination : Claire Danvy - Directrice de la communication | Conception : Direction de la communication | Réalisation : Service universitaire de l'action culturelle
Dépôt légal : ISSN 2729-0077

communication@unicaen.fr