

microscoop

Un regard sur les laboratoires CNRS en Centre Limousin Poitou Charente

Hors série #24 - octobre 2024



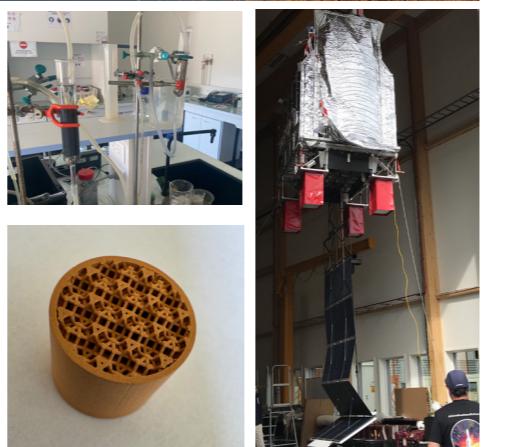
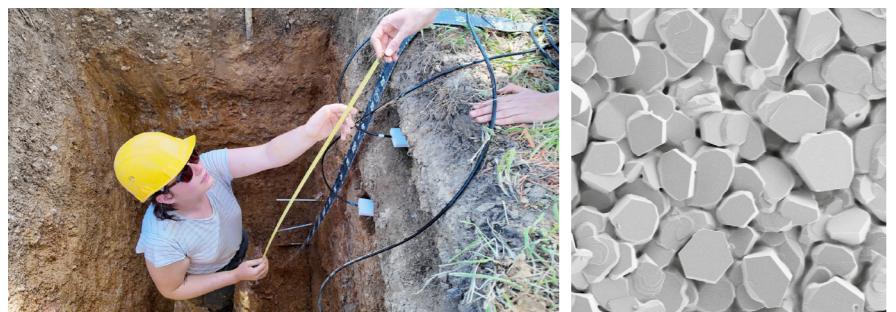
L'EAU,
de la terre à l'espace

Des céramiques texturées
pour la production
d'hydrogène décarbonée

Le premier vol
transatlantique sous
ballon stratosphérique



cnrs



4 Eau

- Écouter les cours d'eau pour comprendre leur dynamique
- Suivre les trajets invisibles de l'eau
- L'eau, nouveau carburant pour les satellites ?
- Traitement des eaux souterraines agressives du Limousin : une nécessité

12 Matériaux

- Sur les traces des premiers monnayages célestiques en laiton
- Des céramiques texturées pour la production décarbonée d'hydrogène

16 Environnement

- Le premier vol transatlantique sous ballon stratosphérique

18 Chimie

- Propulsion spatiale : vers le remplacement des ergols toxiques



ISSN 1291-8083

Photo couverture : Barges pour le déploiement de la chaîne de mesure du transport solide sur les grands cours d'eau.
© Jules Le Guern - CITERES

CNRS Centre Limousin Poitou Charente
3E, Avenue de la Recherche Scientifique
CS 10065 – 45071 ORLÉANS CEDEX 2
T 02 38 25 52 01
www.centre-limousin-poitou-charente.cnrs.fr
Contact : [@DR08_CNRS](mailto:Communication@dr8.cnrs.fr)

Directeur de la publication
Ludovic Hamon

Secrétaires de la publication
Florence Royer
Miléna Verot

Création graphique/conception
Linda Jeuffrault

Ont participé à ce numéro :
Anne Aimable, Alex Andreadult,
Yann Batonneau, Romain Beauchet,
Émilie Bechade, Marc Bellenoue,
Maryse Blet-Lemarquand, Camille Bossavit,
Bastien Boust, Laurent Caner, Valéry Catoire,
Vanessa Ernst-Maillet, Geneviève Feuillade,
Pierre Fischer, Pierre-Marie Geffroy,
Patrick Jacquet, Philippe Jugé,
Jules Le Guern, Stéphane Mazouffre,
Élisabeth Nau, Sylvia Nieto-Pelletier,
Virginie Pallier, Clémence Pavageau,
Fabiano Perini, Guillaume Largeau,
Stéphane Rodrigues.

Éditorial

Comme chaque année depuis 1991, la fête de la science offre une opportunité aux citoyens de rencontrer les scientifiques. C'est un temps d'échange et de partage organisé soit dans des lieux publics spécialement aménagés pour l'occasion, soit au sein des laboratoires eux-mêmes. Nous avons jamais eu autant besoin de science, notamment pour éclairer le débat public, et nous avons le devoir de diffuser cette culture scientifique auprès des citoyens. Les scientifiques seront mobilisés pour accueillir le public, passionnés de sciences ou tout simplement curieux, et présenter leurs travaux sous différents formats : conférences, démonstrations, visite d'installations... Ce nouveau numéro de Microscoop est une illustration des recherches qu'il est possible de découvrir en allant à la rencontre des laboratoires en Centre Limousin Poitou Charente.

Une diffusion plus large de Microscoop est prévue à l'occasion de cette nouvelle fête de la science. Les lecteurs et lectrices y trouveront une nouvelle rubrique sur l'eau. L'eau est étudiée par le CNRS sous toutes ses formes et ses transformations. L'établissement est un acteur majeur de la recherche sur l'eau. Il est ainsi co-pilote du PEPR* One water qui a vocation à mettre les recherches sur les ressources en eau au cœur de la transition durable des territoires. Le CNRS occupe également une position essentielle dans le domaine de l'innovation en se classant 3^{ème} au niveau mondial et 1^{er} au niveau européen des universités et organismes publics de recherche en nombre de dépôts de demandes de brevets dans le secteur des technologies liées à l'eau**. Quatre articles de ce numéro exposent ainsi des sujets sur "l'eau" étudiés à Tours, Limoges, Poitiers et Orléans dont certains sont assez inattendus comme l'utilisation de l'eau comme nouveau carburant pour la propulsion électrique des satellites.

Microscoop évolue avec cette nouvelle rubrique sur l'eau tout en poursuivant sa vocation à diffuser la science et à y faire adhérer le plus grand nombre tant le rôle de la science est important pour la progression des connaissances et le développement de notre société.

Je terminerai en remerciant par avance les personnels des laboratoires qui se mobilisent sur tous les sites de la circonscription pour recevoir le public de la Fête de la Science 2024 entre le 4 et le 14 octobre lors de portes ouvertes comme celles du campus CNRS à Orléans les 5 et 6 octobre, ou pour des démonstrations, des conférences ou des ateliers dans les universités, dans les médiathèques, dans les centres villes transformés pour l'occasion.

Bonne fête de la science à toutes et tous !

Ludovic Hamon
Délégué régional



Le CNRS et ses laboratoires sont des acteurs et animateurs de premier plan dans tous les travaux de recherche sur et autour de l'eau. En Centre Limousin Poitou Charente, plusieurs laboratoires sont investis dans cette thématique extrêmement importante en cette ère de changements climatiques et d'évolution de nos environnements. Microscoop lance, à partir de ce numéro, une série d'articles où l'eau, sous toutes ses formes, est au cœur des sciences humaines, de la physique, de la chimie, de l'ingénierie, de l'environnement.

Écouter les cours d'eau pour comprendre leur dynamique



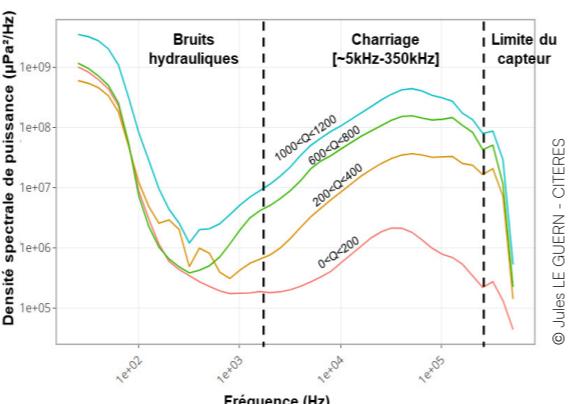
Barges pour le déploiement de la chaîne de mesure du transport solide sur les grands cours d'eau.

Les cours d'eau constituent des agents géologiques majeurs largement impliqués dans l'évolution des continents. En plus des eaux de ruissellement qu'ils collectent sur leur bassin versant, ils transportent les produits de l'altération chimique (sous forme dissoute) et de la désagrégation physique des continents que l'on nomme charge sédimentaire solide.

Dans cette dernière, la charge sédimentaire dite de fond (*bedload*) concerne les sédiments transportés par charriage, roulement ou traction additionnés aux sédiments en contact épisodique avec le fond (saltation). La taille, la nature et la quantité de charge sédimentaire de fond véhiculée par un cours d'eau reflète une partie de l'apport sédimentaire qui lui est délivré. Elle influence la dynamique du cours d'eau au même titre que les grandeurs hydrauliques et morphologiques telles que le débit liquide, la pente et le ratio largeur/profondeur.

L'érosion, le transport et le dépôt des sédiments conditionnent l'évolution morphologique des chenaux, de la plaine d'inondation et celle des vallées qu'ils sculptent au cours du temps. À des échelles temporelles plus courtes, ces processus régissent en grande partie la dynamique écologique et biogéomorpho-

logique de ces environnements souvent reconnus comme des hotspots de biodiversité. Par exemple, la dynamique des barres sédimentaires ("bancs de sables") présents dans les chenaux rend possible le renouvellement d'espèces pionnières comme les saules et les peupliers.



Spectres acoustiques de la Loire à Gien montrant l'augmentation de l'intensité sonore mesurée entre 5 kHz et 350 kHz avec le débit du fleuve (noté Q). Ceci traduit l'augmentation du flux solide de fond depuis les faibles débits vers les forts débits.



Échantilleuse de charge de fond (BTMA - Bedload Transport Meter Anhem) en position de mesure dans le chenal principal de la Loire.

Parmi les sédiments transportés, le sable constitue la troisième ressource naturelle exploitée par les sociétés humaines à l'échelle mondiale. L'utilisation raisonnée de cette ressource constitue un défi de durabilité globale impliquant la bonne gestion du continuum terre-mer. Les modalités du transport du sable au sein des systèmes fluviaux constituent un sujet scientifique ne serait-ce qu'au niveau des flux de matières globaux vers les bassins océaniques. Le transport du sable par les fleuves contribue à édifier des habitats, des paysages et des puits de carbone au sein des vallées. La perturbation de sa dynamique par les sociétés humaines est également source de risques tels que les inondations, l'érosion des côtes, l'instabilité des infrastructures comme les ponts, les digues,....

"la puissance acoustique produite par la collision des particules sédimentaires"

LE SABLE, UNE RESSOURCE À QUANTIFIER

Pour toutes ces raisons, une quantification optimisée des sédiments sableux transportés en charge de fond est nécessaire pour assurer une meilleure gestion/restauration des systèmes fluviaux. En 2024, ce point demeure un verrou scientifique et technique pour la communauté internationale, spécifiquement pour les grands cours d'eau. La quantification y est rendue délicate du fait du gabarit des chenaux (largeur évoluant entre plusieurs centaines de mètres et plusieurs kilomètres), de la grande variabilité des profondeurs et de la présence de formes du lit (dunes et barres sédimentaires par exemple). Dans les grands systèmes fluviaux, la quantification de la charge de fond des cours d'eau est classiquement abordée par des méthodes directes faisant appel à la mesure des flux par échantilleurs ou par le suivi de la migration des formes sédimentaires (*dune-tracking*). Des méthodes indirectes reposant sur les suivis bathymétriques* à haute fréquence et l'emploi de formulations empiriques ou semi-empiriques permettant d'estimer une capacité de transport sédimentaire sont également largement utilisées. Cependant, l'ensemble de ces méthodes souffre d'imprécisions et pour certaines d'entre elles de difficultés de déploiement.

UNE MESURE PAR HYDROPHONE

L'essor récent des outils acoustiques permet l'optimisation de la quantification de la charge de fond des cours d'eau. Parmi ces méthodes innovantes, l'acoustique passive mesure la puis-

sance acoustique produite par la collision des particules sédimentaires lors de leur déplacement sur le fond. La puissance acoustique du charriage est principalement fonction du nombre d'impacts entre particules mais d'autres paramètres tels que la forme des particules et leur vitesse d'impact influencent le signal acoustique mesuré par les hydrophones. Des paramètres environnementaux, comme la turbulence des écoulements ou la concentration en matières en suspension, régissent également la propagation du son dans les rivières et modifient le signal acoustique. La fréquence des sons associés aux chocs des particules est quant à elle inversement proportionnelle à la taille des sédiments ; ainsi la majorité du signal acoustique produit par les sables s'exprime dans le domaine des ultrasons. L'hydrophone, récemment employé pour l'analyse du charriage de rivières de montagne à forte pente et à granularité grossière, montre de fortes potentialités sur les grands systèmes fluviaux de plaine. Une loi de calibration combinant des mesures par échantilleurs et hydrophone sur la Loire permet de convertir la puissance acoustique mesurée par un hydrophone en taux de charriage unitaires. Cette loi rejoint une loi de calibration globale et alimente des courbes de tarage solide du charriage pour différentes stations sur le bassin de la Loire et sur celui du Paraná en Argentine.

DES MILLIERS DE TONNES CHARRIÉES ANNUELLEMENT

Les résultats préliminaires apportent une première quantification du flux solide de fond sur le bassin de la Loire et de ses principaux affluents**. En amont du Bec d'Allier, la Loire et l'Allier contribuent à ce flux à hauteur de 32 000 et 80 000 t/an, respectivement. Au niveau de Gien dans le Loiret, 115 000 t/an de sédiments de fond sont charriés par la Loire et 255 000 t/an à St Mathurin-sur-Loire dans le Maine-et-Loire, en aval du Bec de Vienne. La Vienne, à Rivière en Indre-et-Loire et le Cher à Villandry dans le même département, transportent entre 5000 et 6000 t/an. Ces premières estimations seront affinées d'ici la fin du projet de recherche qui s'y consacre. L'hydrophone est également utilisé pour mieux comprendre les dynamiques des barres sédimentaires et des dunes rythmées par l'hydrologie sur la Loire et le Rio Paraná (en collaboration avec le laboratoire FICH de l'Universidad Nacional del Litoral de Santa Fé, Argentine).

En plus des résultats fondamentaux novateurs sur la morphodynamique des grands systèmes fluviaux à charge sablo-graveleuse, les travaux développés par le laboratoire CItés, TERritoires, Environnement et Sociétés (CITERES — UMR 7324 CNRS/Université de Tours) et le CETU Elmis de l'Université de Tours participent à la hiérarchisation et au dimensionnement des travaux de restauration en cours sur le lit de la Loire entre Nevers et Nantes.

Stéphane RODRIGUES - CITERES
srodrigues@univ-tours.fr

Jules LE GUERN - CITERES
leguern@univ-tours.fr

Alex ANDRÉAULT - CITERES
alex.andreault@univ-tours.fr

Philippe JUGÉ - CETU ELMIS INGÉNIERIES
juge@univ-tours.fr

<https://citeres.univ-tours.fr/>

* techniques de mesure des profondeurs et des reliefs des cours d'eau ou des océans pour en déterminer la topographie

** projet SSESAR, financement Région Centre Val de Loire

Suivre les trajets invisibles de l'eau

Dans un contexte où les changements climatiques affectent les ressources en eau, il est d'autant plus nécessaire de bien comprendre le devenir de cet élément précieux après les épisodes de pluie, en fonction de la saison. Réussir à mesurer ces flux d'eau invisibles, par des moyens indirects, devient alors indispensable.

L'eau qui atteint la surface du sol durant les précipitations peut avoir différents devenirs. Elle peut ruisseler sur la surface et rejoindre les cours d'eau en suivant les pentes topographiques. Elle peut également être retenue dans les couches de surface du sol, puis retourner à l'atmosphère sous forme gazeuse par l'évaporation des sols ou la transpiration des plantes. Enfin, elle peut s'infiltrer plus profondément dans les sols, former des réserves d'eau pour les plantes (appelés réservoirs utiles) et éventuellement participer à la recharge des nappes d'eau souterraine.

Si la pluie et le ruissellement sont des variables hydrologiques relativement simples à observer et mesurer, ce n'est pas le cas des autres modalités de trajet de l'eau. L'évaporation et la transpiration (regroupées en hydrologie sous le terme d'évapotranspiration) représentent des flux d'eau sous forme gazeuse et donc invisible à l'œil. L'infiltration s'effectue au travers du réseau poral dans les sols et des roches, sous la surface, et n'est donc pas directement observable non plus.

MESURER DES FLUX D'EAU INVISIBLE À L'ŒIL

Le Site Expérimental Hydrogéologique (SEH) de Poitiers, situé au sein du jardin botanique de l'université, est dédié à l'étude des ressources en eau souterraine. Ce site est rattaché à l'Institut de Chimie des Milieux et Matériaux de Poitiers (IC2MP, CNRS/Université de Poitiers). Mis en place à partir de 2002, il a d'abord été équipé d'instruments de mesures permettant de suivre en



Installation de sondes dans une fosse pédologique pour suivre l'infiltration.

continu la pluie, le niveau de la nappe souterraine présente dans les roches calcaires et des variables météorologiques comme la pression atmosphérique ou l'humidité de l'air mesurée toutes les 30 minutes.

Depuis 2023, de nouveaux équipements ont été ajoutés, plus spécifiquement dédiés aux suivis de l'évapotranspiration et de l'infiltration.

Tout d'abord, une station micro-météorologique réalise un bilan énergétique à très haute fréquence (10 mesures par seconde) pour quantifier la quantité d'eau évapotranspirée toutes les 30 minutes. Puis deux dispositifs de Tomographie de Résistivité Électrique du sol (TRE) dont le principe, à l'instar d'un scanner médical, est d'imager les structures sous la surface (du sol dans ce cas). Ces appareillages sont composés de 48 électrodes, des tiges d'acier inoxydable installées en surface et espacées de 50 cm pour l'un et de 1 m pour l'autre. Grâce à ces installations, on obtient une image des résistivités électriques du sol, jusqu'à 10 m de profondeur, via des mesures de tensions induites par des courants électriques générés entre les électrodes. La résistivité d'un sol dépend de sa teneur en eau et de sa composition. Plus la teneur en eau dans le sol est élevée et mieux il pourra conduire l'électricité (et donc sa résistivité diminuera). En réalisant des acquisitions de TRE à différentes périodes les scientifiques ont donc, indirectement, une idée de l'évolution de la quantité d'eau dans le sol.

Enfin, quatre fosses pédologiques, ouvertes temporairement jusqu'à 2 m de profondeur, ont permis de récupérer des échantillons de sol à différents endroits et profondeurs ainsi que de réaliser des observations et mesures directes. Les prélèvements sont ensuite analysés en laboratoire afin de déterminer les propriétés (minéralogiques, physiques, hydriques, chimiques...) des différentes couches du sol. Les propriétés du sol telles que la porosité, la conductivité hydraulique, la structure et la réserve utile jouent un rôle important sur l'infiltration et les transferts d'eau en profondeur. Ces fosses ont également été équipées de sondes de suivi de la teneur en eau à différentes profondeur (21 sondes au total entre 30 cm et 1,80 m de profondeur). Elles assurent, localement, un suivi de la teneur volumique en eau dans un volume de sol avec une mesure toutes les 30 minutes. Certaines sont accompagnées de mesures locales de résistivité électrique du sol afin de faire le lien avec les dispositifs de TRE en surface.

"une description plus précise de la répartition de l'eau"

DES SUIVIS DANS LE TEMPS ET DANS L'ESPACE

Les mesures obtenues avec ces nouveaux équipements scientifiques visent à assurer un suivi à haute résolution temporelle des variables hydrologiques comme la pluie, l'évapotranspiration et l'infiltration. De plus, les images de résistivités électriques du sol, acquises à différents moments de l'année, donnent une information spatialisée sur l'hétérogénéité de la présence d'eau dans le sol. La variation des teneurs en eau mesurées avec les sondes permet de suivre l'infiltration de l'eau au cours du temps après une pluie ou inversement l'assèchement du sol sous l'effet de l'évapotranspiration.

Ces précieuses données offrent une description plus précise de la répartition de l'eau à l'échelle du site expérimental, représentatif du contexte géologique et pédologique régional. L'analyse des quantités d'eau évapotranspirées et infiltrées, entre chaque épisode de pluie et en fonction des conditions climatiques, facilitent la compréhension de la saisonnalité du cycle de l'eau, avec les périodes d'humidification et d'assèchement des surfaces. Cela permet, par exemple, de mieux comprendre et expliquer quelles conditions favorisent la recharge des nappes d'eau souterraines ou encore de mieux anticiper des risques d'assèchements sévères des sols.

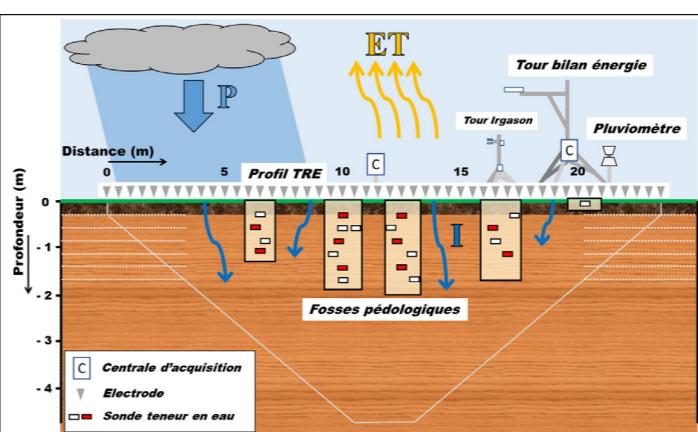


Schéma présentant les équipements installés pour suivre la pluie (P), l'évapotranspiration (ET) et les infiltrations (I) (exagération verticale x2). Les sondes colorées en rouge mesurent également la résistivité électrique du sol.



Le Site Expérimental Hydrogéologique (SEH), situé en périphérie de Poitiers, permet d'acquérir des mesures pour la recherche dans le domaine des écoulements souterrains.

Plus fondamentalement, ces données rendent possible une meilleure appréhension des phénomènes qui entrent en jeu au niveau de l'interface sol-végétation-atmosphère et qui conditionnent la répartition de l'eau arrivant par la pluie. Quel va être l'impact des propriétés du sol sur l'infiltration durant un épisode pluvieux ? Quel effet l'intensité de la pluie va-t-elle avoir sur la mise en place de ruissellements de surface ? Comment les plantes vont-elles pouvoir mobiliser de l'eau présente dans le sol pour assurer leur croissance en période sèche ? Autant de questions sur des phénomènes précis qui interviennent simultanément et pour lesquelles il est important d'acquérir ces données.

Améliorer la compréhension de ces phénomènes permettra de mieux anticiper les effets des changements climatiques en cours qui affectent la température de l'air et induisent, de fait, des modifications des conditions hydro-météorologiques (pluviosité et pouvoir évaporatoire) et des écosystèmes locaux comme les cultures, les prairies, les forêts....

Clémence PAVAGEAU - IC2MP
clemence.pavageau@univ-poitiers.fr

Pierre FISCHER - IC2MP
pierre.fischer@univ-poitiers.fr

Laurent CANER - IC2MP
laurent.caner@univ-poitiers.fr

<https://ic2mp.lab.univ-poitiers.fr/>

Le site expérimental de Poitiers est regroupé, avec 6 autres sites français, au sein du Service National d'Observation (SNO) H+ de CNRS Terre & Univers. Il consiste notamment à rendre accessible au grand public le travail d'observation réalisé par les hydrogéologues sur les différents contextes rencontrés en France. Le site internet du SNO H+ propose un accès gratuit aux mesures. Cette démarche contribue à rendre la science plus transparente, plus ouverte et plus accessible.

Projet financé par : Région Nouvelle Aquitaine - Agence de l'Eau Loire Bretagne - Agence de l'Eau Adour Garonne

L'eau, nouveau carburant pour les satellites ?

Des recherches en cours suggèrent que l'eau pourrait devenir un nouveau carburant pour la propulsion électrique des satellites. Le développement d'un propulseur à eau requiert cependant d'énormes expériences en apesanteur.

Deux modes de propulsion cohabitent aujourd'hui pour les véhicules spatiaux. La propulsion chimique génère une forte poussée ; elle est donc adaptée aux fusées et lanceurs. La propulsion électrique, ou ionique, consomme très peu de carburant. Elle est donc privilégiée pour les satellites car elle réduit drastiquement la taille et la masse de ces derniers. Cet essor au cours des deux dernières décennies a ainsi permis la miniaturisation des satellites et l'émergence de constellations dont certaines comptent plusieurs centaines d'unités. Il existe un grand nombre de technologies de propulseurs électriques, mais le principe de base reste le même : accélérer des particules chargées électriquement (des ions positifs) à l'aide d'un champ électrique ou d'une force électromagnétique. Le "carburant" de ces propulseurs est donc très éloigné des carburants classiques de la propulsion chimique comme l'hydrogène, le kérénne ou le méthane.

On recherche ici un carburant qui soit lourd, énergétiquement peu coûteux à ioniser, non toxique et si possible abordable. Ces critères ont conduit les industriels de l'aéronautique à privilier le xénon et le krypton, deux gaz rares. Mais l'emploi à grande échelle de ces gaz a conduit à une flambée des prix et à de vives tensions sur le marché. Les chercheurs et les ingénieurs se sont donc lancés à la recherche de carburants alternatifs.

"la seule technologie qui n'éjecte pas d'ions pour générer une poussée."

UN RÉSISTOJET À EAU

Le diode, molécule composée de deux atomes d'iodine, a rapidement émergé comme solution potentielle. Une startup française, ThrustMe, a été la première à commercialiser des propulseurs au diode qui équipent aujourd'hui des dizaines de petits satellites. Mais le diode est chimiquement agressif et complexe à manipuler. Il existe pourtant une autre alternative attrayante : l'eau. Cette molécule (H_2O) est abondante, non toxique, peu chère et stockable sous forme liquide. Néanmoins, elle est coûteuse à ioniser. De plus une quantité non négligeable d'énergie peut être perdue dans la rotation et la vibration de ses atomes lors de l'ionisation. Elle apparaît donc particulièrement intéressante dans le cas où l'on ne fait pas appel à des ions. Les chercheurs du laboratoire ICARE (UPR3021 CNRS) ont ainsi décidé de développer

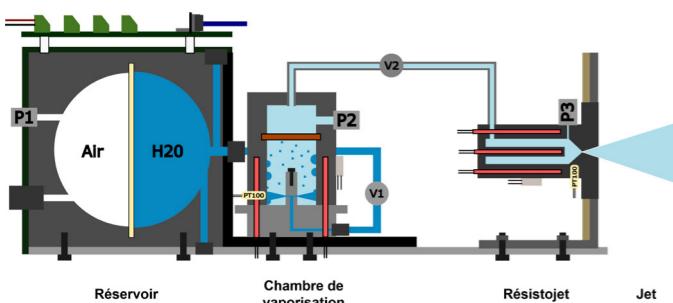


Schéma de principe du propulseur résistojet à eau (P : pression, V : vanne).

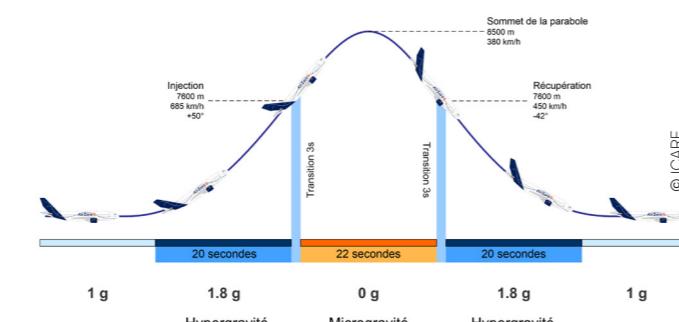
et d'étudier un propulseur résistojet à eau. Il est le plus simple des propulseurs électriques. C'est la seule technologie, mise au point par la scientifique canadienne Yvonne Brill dès 1966, qui n'éjecte pas d'ions pour générer une poussée. Le principe de fonctionnement d'un résistojet est simple : un gaz est porté à haute température (centaines de degrés Celsius) à l'aide d'éléments chauffants puis accéléré et éjecté à l'aide d'une tuyère. Le chauffage résulte ici de l'effet Joule lors du passage d'un courant dans une résistance, et non d'une réaction de combustion : un résistojet convertit donc de l'énergie électrique en énergie thermique puis en énergie cinétique.

L'emploi de l'eau complexifie l'architecture d'un résistojet. L'eau étant naturellement sous forme liquide, elle doit être vaporisée (transition état liquide vers état gazeux) avant d'être chauffée puis éjectée à grande vitesse. Le schéma général d'un propulseur résistojet à eau comporte trois éléments principaux : le réservoir, la chambre d'ionisation et le « résistojet » où la vapeur d'eau est chauffée puis détendue à travers une tuyère. Le jet d'eau créé dans le vide spatial est à l'origine d'une force de poussée capable de mettre en mouvement un satellite.

DES TESTS EN VOLS PARABOLIQUES

L'eau est injectée sous forme de gouttelettes dans la chambre de vaporisation, on parle d'atomisation ou de dispersion, avant d'entrer en contact avec les éléments chauffants sur lesquels elles sont vaporisées. L'interaction gouttelettes-résistances joue donc un rôle critique dans les performances du propulseur. Des expériences ont bien sûr été réalisées à ICARE pour optimiser cette interaction en jouant sur l'injection, la géométrie et la puissance. Mais voilà, les gouttelettes se comportent différemment dans l'espace où la gravité est absente. Un montage expérimental unique et complexe, comprenant une chambre à vide dans lequel est placé le résistojet, un système de pompage, un ensemble de composants électriques et électroniques et des équipements de mesures, a ainsi été construit avec le soutien de l'Agence Spatiale Française (CNES) afin de mener des expériences en apesanteur.

Une situation de micropesanteur, ou microgravité, peut être créée lors d'un vol parabolique. Au sommet de la parabole, une phase de microgravité ($\sim 0,01 g$ d'accélération résiduelle) est



Trajectoire et phases d'un vol parabolique pour créer un état d'apesanteur.



Expériences avec le propulseur résistojet à eau au sommet d'une parabole (état de micropesanteur). Le montage expérimental dédié fixé au plancher de l'avion et plusieurs membres de l'équipe d'ICARE réalisant des mesures en phase de « 0 g ».

atteinte. La durée de cette phase est courte, 22 secondes, mais suffisamment longue pour mener à bien des études. En comparaison, les tours à chute libre offrent seulement 1 à 3 secondes de microgravité. Une campagne de vols comprend plusieurs séries de paraboles, ce qui permet d'accumuler du temps et donc des données. Les expériences d'ICARE ont été réalisées à bord de l'Airbus A310 AirZeroG de la société NoveSpace, une filiale du CNES au cours de la campagne VP177 en mars 2024.

COMPARAISON SOL – VOL 0G

Le test d'un résistojet dans une chambre à vide en microgravité représentait une première mondiale et un véritable tour de force. Des données précieuses et inédites ont ainsi pu être recueillies non seulement en 0 g mais aussi en phase d'hypergravité à 1,8 g. Cette campagne a d'abord permis de vérifier le fonctionnement du résistojet à eau en apesanteur. Grâce à des mesures de pression et de température dans diverses parties du système, les chercheurs ont montré que la vaporisation des gouttelettes d'eau est similaire sur Terre à 1 g et en microgravité grâce à la géométrie particulière de la chambre de vaporisation. En d'autres termes, on observe un bon accord sol – vol 0 g pour le résistojet d'ICARE.

Il faut désormais aller plus loin afin d'optimiser les performances du résistojet. Les chercheurs d'ICARE réfléchissent ainsi à de nouvelles expériences en microgravité tournées cette fois-ci vers l'observation précise en temps réel de la vaporisation des gouttelettes via de l'imagerie à haute cadence et de la thermogra-

phie infrarouge. Des mesures de la poussée in-situ sont aussi envisagées afin de déterminer la valeur expérimentale du rendement pour diverses configurations. Finalement, les chercheurs poussent la réflexion encore plus en avant et envisagent le développement d'un système hybride combinant la propulsion chimique (forte poussée pour des transferts rapides) à la propulsion électrique (faible poussée pour des manœuvres fines) basé non plus sur la vaporisation de l'eau mais sur son électrolyse et la récupération d'hydrogène et d'oxygène. Mais c'est une autre histoire... scientifique.

Stéphane MAZOUFFRE - ICARE
stéphane.mazouffre@cnrs.fr

Fabiano PERINI - ICARE
fabiano.perini@cnrs-orleans.fr

Guillaume LARGEAU - ICARE
guillaume.largeau@cnrs.fr

<https://icare.cnrs.fr/>
<https://www.airzerog.com/fr/>

Traitements des eaux souterraines agressives du Limousin : une nécessité

Des pressions qualitatives s'ajoutent aujourd'hui aux pressions quantitatives sur les ressources en eau sur le territoire français. Deux laboratoires de recherche de Limoges, s'associent pour élaborer des solutions innovantes de reminéralisation et d'élimination des micropolluants organiques à partir de matériaux connus et maîtrisés.



Village d'Argentat côté sud de la rivière dans le Limousin.

Dans les régions aux sols granitiques comme le Limousin, les eaux naturelles sont douces et acides ($5,2 < \text{pH} < 6,1$, $30 < \text{conductivité} (\mu\text{S/cm}) < 120$). Ces eaux sont qualifiées d'agressives et leurs caractéristiques leur confèrent un potentiel de corrosivité envers les équipements hydrauliques. En accord avec l'arrêté du 11 janvier 2007 relatif aux limites et références de qualité des eaux brutes et des eaux destinées à la consommation humaine, ces eaux doivent être ramenées à l'équilibre calco-carbonique par des traitements de reminéralisation. Le plus couramment utilisé pour le traitement des eaux souterraines est la filtration-percolation sur des matériaux alcalino-terreux. Les matériaux usuellement préconisés sont des calcaires terrestres ou marins (algue marine calcaire fossilisée appelée lithothamne), dont la pureté et l'efficacité dépendent de l'origine géographique de leur extraction.

DE NOUVELLES POLLUTIONS ORGANIQUES DANS LES EAUX DU LIMOUSIN

Dans les années 2000, le Limousin comptabilisait près de 1600 captages pour l'alimentation en eau potable et une soixantaine de prises d'eau superficielle. Ainsi, l'alimentation de la population était quasiment équirépartie, avec 45% de la population alimen-



Tests de laboratoire en colonne, simulant des conditions de filtration/percolation *in situ*.

tée par des eaux souterraines contre 55% par des eaux superficielles. Cependant, entre 1998 et 2008, l'exploitation de près de 150 captages a été abandonnée, dont 60% en Haute-Vienne. Ce phénomène a également été observé au niveau national et la dégradation de la qualité de l'eau en représente la cause principale, avec notamment des pollutions chimiques naturelles ou anthropiques, minérales et organiques, encore appelées Micro-Polluants Organiques (MPO, principalement résidus pharmaceutiques humains et vétérinaires, pesticides ou leurs métabolites). En Haute-Vienne, cette dégradation de la qualité de l'eau ajoute à la pression quantitative, une pression qualitative sur la ressource, qui engendre des coûts d'investissement pour créer de nouveaux points de prélèvement et des surcoûts d'exploitation permanents liés au transport des eaux brutes.

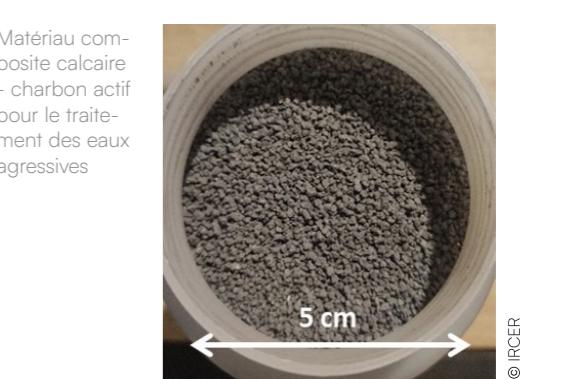
"l'enjeu est de formuler un matériau suffisamment poreux"

L'élimination des MPO dans les stations de traitement pour la production d'eau potable utilise le plus souvent des traitements sur charbon actif. Ils présentent des avantages compétitifs en comparaison à des procédés membranaires par exemple, tant en termes de coût d'investissement et de fonctionnement que d'efficacité de traitement. De plus, ce procédé physique d'adsorption n'entraîne pas de modification chimique de la substance organique et limite ainsi la formation de sous-produits tels que des métabolites au cours du traitement. Toutefois, en région Limousin, tout comme dans de nombreuses autres régions françaises, les stations de reminéralisation n'ont pas été dimensionnées pour assurer l'élimination de ces MPO, et seuls des traitements de reminéralisation et désinfection sont aujourd'hui en fonctionnement sur ces installations. La continuité d'exploitation des ressources souterraines polluées nécessite donc d'adapter la chaîne de traitement, et cette adaptation impose des investissements conséquents, notamment en termes de génie civil. Ces coûts sont malheureusement démesurés au regard des faibles capacités de ces stations de reminéralisation.

COMBINER REMINÉRALISATION ET ÉLIMINATION DES MICROPOLLUANTS

La collaboration entre l'Institut de Recherche sur les Céramiques (IRCR, CNRS/Université de Limoges) et le laboratoire Eau et Environnement de Limoges (E2Lim, Université de Limoges) tend à optimiser une solution technique peu coûteuse permettant d'utiliser les stations de reminéralisation existantes, tout en assurant l'élimination des MPO. Il a donc été proposé de développer un nouveau matériau, ou matériau composite, se présentant comme une association de calcaire et de charbon actif*.

Techniquement, l'enjeu est de formuler un matériau suffisamment poreux pour permettre les échanges avec les eaux brutes, échanges nécessaires à la dissolution du calcaire et à l'adsorption des MPO sur le charbon actif. Il faut aussi maintenir une certaine cohésion pour limiter la dispersion du charbon actif et l'augmentation de la turbidité dans les eaux traitées, et éviter des étapes de coagulation/flocculation/décantation/filtration. La principale difficulté provient de la différence de densité entre les deux matériaux, qui exclut leur utilisation simultanée directement dans les bassins, par simple mélange : le charbon actif, très divisé, peut facilement se retrouver "emporté" dans les eaux de lavage. Les recherches ont donc rapidement mis en évidence la nécessité d'ajouter une phase liante, qu'elle soit de nature organique (type



polymère), ou minérale. D'autres critères ont également été pris en compte : la compatibilité de ces liants vis-à-vis d'une application en eau potable, et la simplicité du procédé, tant en termes de coût que de capacité de production.

L'étude a été confiée à des élèves de l'ENSIL-ENSCI, école d'ingénieurs pluridisciplinaire de l'université de Limoges, dans le cadre de projets de groupe de 4^{ème} année et de projets de recherche de 5^{ème} année. Des élèves de la spécialité Céramique Industrielle (CER) maîtrisant l'élaboration et les procédés de mise en forme des matériaux minéraux et des élèves de la spécialité Génie de l'Eau et Environnement (GEE), spécialistes de l'analyse des milieux aquatiques et de l'optimisation des procédés de traitement, ont travaillé ensemble pour proposer et tester différentes solutions.

Les premiers essais encourageants ont montré une efficacité similaire du matériau composite à celle des matériaux usuels pris séparément. L'étude se poursuit actuellement pour tester ces matériaux en conditions réelles et pour optimiser leurs propriétés (composition, taille, etc...). Ce type de matériau doit rendre possible la pérennité et la remise en service des stations de traitement, et ainsi limiter des pertes de ressources exploitables dans un contexte climatologique préoccupant et à l'origine d'une intensification de la pression sur la ressource en eau.

Anne AIMABLE - IRCER
anne.aimable@unilim.fr

Virginie PALLIER - E2LIM
virginie.pallier@unilim.fr

Geneviève FEUILLADE - E2LIM
genevieve.feuillade@unilim.fr
<https://www.ircer.fr/>

* Ce projet exploratoire dénommé DEMEAU « DÉveloppement de Matériaux composites pour le traitement des EAUX souterraines agressives », a été co-financé par l'Usine de Kervellerin et l'université de Limoges.

Sur les traces des premiers monnayages celtiques en laiton

Longtemps associé à l'arrivée des Romains en Gaule, l'emploi du laiton comme nouvel alliage pour frapper des monnaies celtiques n'a encore jamais été étudié. Un programme interdisciplinaire s'intéresse à cette pratique monétaire inédite et aux choix techniques innovants mis en œuvre par les Celtes.



Monnaies en laiton à la légende Germanus Indutilli L(ibertus), environ 15 av. J.-C., installées pour leur analyse par LA-ICP-MS

Alors que les ateliers monétaires celtiques produisent des monnaies depuis le III^e siècle av. J.-C. en métaux et alliages variés (or, argent, bronzes), les autorités émettrices décident, au cours du I^{er} siècle av. J.-C., d'introduire un nouvel alliage pour émettre certaines séries monétaires : le laiton.

Cet alliage de cuivre et de zinc, dont la couleur est très proche de celle de l'or, est alors peu employé dans la partie occidentale de la Méditerranée pour frapper monnaie. Considéré par Pline comme "un minéral de qualité supérieure [...] le meilleur et le plus recherché", on doit la première trace écrite de sa fabrication à l'historien grec Théopompe au IV^e siècle av. J.-C.

"l'introduction de ce nouvel alliage n'a jamais été étudiée"

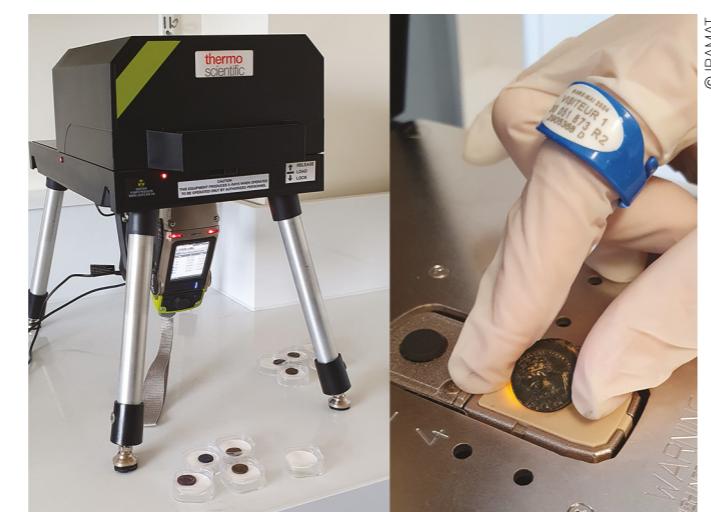
L'usage du laiton dans les sociétés anciennes constitue une innovation technologique : cet alliage est produit par cémentation, en faisant chauffer du cuivre avec des minéraux de zinc sous atmosphère réductrice. Ce procédé s'apparente alors bien plus à une coloration du cuivre — qui passe du rouge au doré — qu'à la confection d'un alliage où plusieurs métaux sont fondus ensemble. D'abord attesté pour la fabrication de la parure dès le III^e millénaire au Proche-Orient notamment, ce n'est qu'à partir du I^{er} siècle av. J.-C. que le laiton est utilisé pour la production monétaire : dès le début du I^{er} siècle en Asie mineure, puis vers 50 pour un usage plus large en particulier dans les provinces romaines d'Asie. À Rome, si quelques émissions sporadiques de monnaies en laiton contemporaines de César sont recensées, c'est la réforme augustéenne en 23 av. J.-C. qui généralise l'emploi de cet alliage dans le système monétaire.

LA GAULE, ROME ET LE LAITON

La situation est plus complexe et plus incertaine pour le monde celtique et notamment la Gaule. Longtemps associée à la "romainisation" et généralement considérée comme un indicateur des dernières émissions gauloises dans la seconde moitié du I^{er} siècle av. J.-C. avant l'arrivée massive des monnaies romaines, la question de l'introduction de ce nouvel alliage n'a pourtant jamais été étudiée. La distinction entre une monnaie de "bronze" (alliage cuivre-étain) et une monnaie de "laiton" (alliage cuivre-zinc) n'est pas visible à l'œil nu plus de 2000 ans après leur fabrication. Sans la mise en œuvre d'analyses élémentaires, il est alors difficile voire impossible aujourd'hui de les différencier.

L'introduction du laiton dans les économies monétaires celtiques renvoie donc à des choix techniques et peut-être également à des usages spécifiques au sein de la société celtique. Seule une démarche interdisciplinaire qui croise les données physico-chimiques aux données numismatiques et archéologiques peut permettre d'évaluer ce phénomène qui s'inscrit, au moins en partie, dans une période de transition politique en lien avec Rome au cours du I^{er} siècle av. J.-C.

Des recherches exploratoires menées à l'IRAMAT ces dernières années ont apporté des résultats significatifs pour quelques régions d'émission invitant à rouvrir le dossier. Substitut bon marché de l'or frappé par les Celtes comme le suggèrent certaines monnaies lors de la guerre des Gaules, voire avant ? Témoin d'une réforme monétaire locale avant son adoption massive par Auguste ?



À gauche, analyseur de pXRF installé sur sa station de travail blindée ; à droite monnaie gauloise (à la légende VERCA, BnF) mise en place sur la fenêtre de mesure de l'analyseur



Monnaies gauloises en laiton : à gauche, exemplaire au nom de Vercingétorix, 52 av. J.-C. (MAN 285) © MAN ; à droite, exemplaire à la légende CONTOTVS émis dans le centre-ouest de la Gaule, 40-30 av. J.-C. (BnF 4322) © Gallica, BnF



CONNAÎTRE LA COMPOSITION ÉLÉMENTAIRE DES MONNAIES EN ALLIAGES CUIVREUX SANS LES ENDOMMAGER

Les monnaies en alliages cuivreux présentent bien souvent en surface une couche de corrosion, la patine, d'épaisseur variable et dont la composition diffère fortement de la partie interne. Une des difficultés est donc de parvenir à analyser le métal monétaire sous la couche de corrosion sans créer de dommage. Pour répondre à cet objectif, une méthode d'analyse non destructive, par activation neutronique (ANRC), unique en France, a été développée à l'IRAMAT dans les années 1980 à l'aide du cyclotron d'Orléans (CEMHTI). Elle a été appliquée à des milliers de monnaies jusqu'à la fermeture de cet accélérateur de particules en janvier 2023. La méthode pXRF (portable X-Ray Fluorescence) est une autre approche, très répandue, moins onéreuse, plus rapide et surtout plus facile à mettre en œuvre. Mais elle est aussi moins performante puisque la couche superficielle de corrosion contribue aux résultats obtenus. Toutefois, la pXRF permet le plus souvent d'identifier le type d'alliage et notamment de distinguer les laitons (cuivre-zinc) des bronzes (cuivre-étain). C'est cette méthode qui est employée à grande échelle, au sein même des collections muséales et archéologiques, pour le projet Celtic Brass Coins.

Des tests sont également en cours à l'IRAMAT pour développer la méthode d'analyse par LA-ICP-MS (spectrométrie de masse couplé à un plasma inductif avec ablation laser), plus performante que la pXRF, sur des monnaies celtiques et romaines en laiton.

Sylvia NIETO-PELLETIER - IRAMAT
sylvia.nieto@cnrs-orleans.fr

Camille BOSSAVIT - IRAMAT
camille.bossavit@cnrs-orleans.fr

Maryse BLET-LEMARQUAND - IRAMAT
maryse.lemarquand@cnrs-orleans.fr

<https://iramat.cnrs.fr/>
<https://brasscoins.hypotheses.org/>

Les 6 laboratoires impliqués dans le projet : IRAMAT, CRAHAM, Bibracte EPCC, BnF, MAN, MSH Val de Loire.
Bibracte EPCC : établissement public de coopération culturelle
BnF : Bibliothèque nationale de France, Paris
CRAHAM : Centre de Recherches Archéologiques et Historiques Anciennes et Médiévales, UMR 6273, Caen
MAN : Musée d'archéologie nationale, Saint-Germain-en-Laye
MSH Val de Loire : Maison des Sciences de l'Homme Val de Loire, UAR 3501, Tours
CEMHTI : Conditions Extrêmes et Matériaux : Haute Température et Irradiation, UPR 3079, Orléans
Ce projet est financé par l'ANR.

Des céramiques texturées pour la production décarbonée d'hydrogène

La production d'hydrogène passe par l'électrolyse de l'eau que les chimistes maîtrisent parfaitement. Il manque encore à optimiser les systèmes existants. Certaines céramiques apporteraient les qualités recherchées.



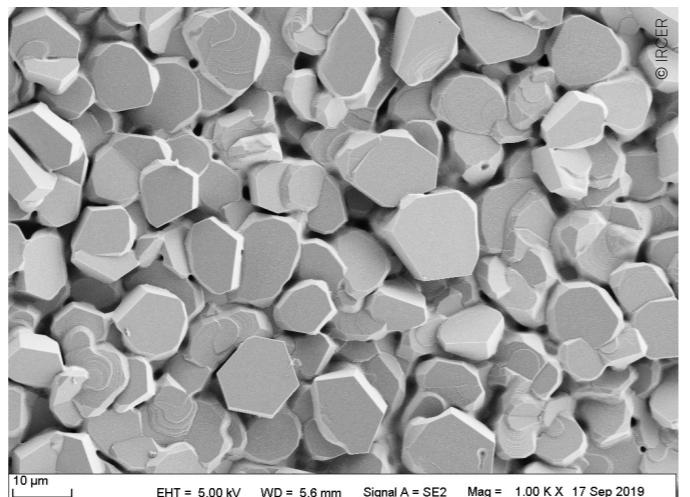
L'hydrogène, un vecteur chimique d'avenir.

L'hydrogène est un vecteur chimique et énergétique qui permettra à l'avenir d'engager la transition énergétique en s'affranchissant des ressources aux carburants fossiles. La fabrication d'hydrogène par l'électrolyse de l'eau alimentée en électricité renouvelable (d'origine solaire ou éolienne, voire nucléaire) conduit ainsi à envisager une décarbonation massive de nos systèmes de production d'énergie. Le principe de l'électrolyse de l'eau est simple : convertir l'eau en hydrogène et oxygène avec de l'électricité.

Des efforts importants de recherche et de développement à l'échelle nationale au sein du PEPR hydrogène sont aujourd'hui consacrés au déploiement de nouveaux systèmes de fabrication d'hydrogène décarbonée. Deux projets de recherche, CELCER-EHT et FLEXISOC, dans lesquels s'investit l'Institut de Recherche sur les Céramiques (IRCER, CNRS / Université de Limoges), portent respectivement sur le développement d'électrolyseurs fonctionnant entre 700°C et 800°C pour la production massive d'hydrogène, ou le développement de piles à combustible compatibles avec des combustibles variés pour la génération d'électricité à partir de la biomasse. Dans le cadre de ces deux applications, les scientifiques observent que l'un des verrous technologiques est aujourd'hui d'avoir des électrolytes présentant une excellente stabilité chimique associée à une conduction ionique élevée dans une gamme de températures d'utilisation plus modérée (<700°C). Un électrolyte solide est un matériau conducteur d'énergie permettant le transport d'ions (dans le cas de l'électrolyse de l'eau, l'ion oxygène) sous l'action d'un champ électrique.

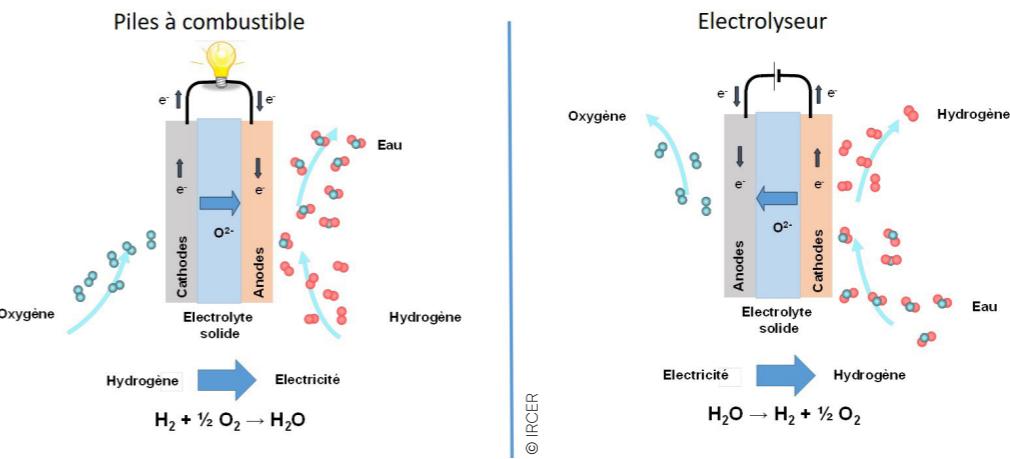
ENJEUX ÉCONOMIQUES : DURABILITÉ ET PERFORMANCES

L'un des avantages des électrolyseurs (où se produit la réaction chimique conduisant à la production d'hydrogène) fonctionnant à haute température (700-800°C typiquement), ou type SOEC (comme Solid Oxide Electrolysis Cell), est d'atteindre des rendements énergétiques élevés et bien supérieurs à ceux obtenus avec des électrolyseurs fonctionnant à basse température. Les technolo-



Couche de cristaux d'oxyapatite orientée selon l'axe cristallographique c, obtenue par frittage-réactif à 1600°C de couches de réactifs

Mode de fonctionnement réversible



Principe de fonctionnement d'une pile à combustible du type SOFC (Solid Oxide Fuel Cell en anglais) et d'un électrolyseur.

logies à basse température ont aujourd'hui un bon degré de maturité pour être industrialisées alors que les électrolyseurs à haute température nécessitent encore une amélioration de leurs performances et de leur durabilité pour être économiquement compétitifs. Leurs températures élevées de fonctionnement sont nécessaires pour assurer une conduction optimale des ions oxygène au travers du matériau d'électrolyte solide (l'isolant électrique et conducteur ionique), généralement de l'oxyde de zirconium dopé avec de l'yttrium. Cependant, elles conduisent également à une diminution de la durabilité des performances du système après une longue période d'utilisation (plusieurs milliers d'heures). Ainsi, les récents travaux de recherche dans ce domaine visent à la fois à abaisser les températures de fonctionnement des électrolyseurs du type SOEC, en utilisant de nouveaux matériaux avec des performances électrochimiques supérieures, ou conduisant à une amélioration de la durabilité du système dans les conditions d'utilisation.

Depuis plusieurs années, les chercheuses et chercheurs de l'IRCER s'efforcent de développer de nouveaux matériaux hautes températures pour piles à combustibles ou électrolyseurs SOFC (Solid Oxide Fuel Cell)-SOEC, et en particulier des électrolytes plus durables et performants pour conduire les ions oxygène, à des températures de fonctionnement plus adaptées (<700°C).

"des applications prometteuses pour la production massive d'hydrogène"

DES PROPRIÉTÉS DE TRANSPORT EXCEPTIONNELLES

Parmi les matériaux céramiques envisagés comme électrolyte, les silicates de lanthane de la famille des apatites présentent d'excellentes propriétés de conduction des ions oxygène et une bonne stabilité chimique. En effet, l'empilement des atomes dans ce matériau céramique constitue ce que l'on nomme « une maille cristalline de forme hexagonale ». Cette organisation des atomes a la particularité de former de grands canaux de conduction pour les ions oxygène, orientés le long d'un axe de l'hexagone. La quantité d'oxygène dans ces canaux et les éléments chimiques environnants peuvent être ajustés afin d'optimiser les propriétés de transport de l'oxygène à travers ce matériau. Dans les récents travaux dans le cadre du projet FLEXISOC, l'IRCER a conçu un procédé innovant de mise en forme en vue d'obtenir un électrolyte texturé d'oxyapatite. Cet électrolyte texturé présente une conduction ionique à l'oxygène exceptionnellement élevée à

température modérée (<700°C), qui est près d'un ordre de grandeur plus élevée que celle de la zircone yttrée, matériau de référence dans le domaine. Les propriétés de conduction de ce matériau permettent d'envisager un abaissement très significatif des températures usuelles des électrolyseurs de type SOEC, ou des piles à combustible de type SOFC.

L'originalité du procédé qui conduit à obtenir un électrolyte texturé, repose sur un traitement thermique à haute température qu'on appelle « frittage » et la réactivité entre des couches alternées de matériaux céramiques : La₂SiO₅ (oxyapatite silicatée) et SiO₂ (silice) qui sont mises en forme par coulage en bande. La mise au point de ce procédé est le fruit de nombreuses années de recherche. Les travaux du laboratoire ont abouti à mieux cerner et contrôler les mécanismes réactionnels mis en jeu dans la formation et la croissance des cristaux d'oxyapatite orientés pendant l'étape de consolidation du matériau ou de frittage. Ces derniers ont acquis, lors de cette opération, les qualités recherchées. En particulier, ces travaux montrent que le mécanisme de formation des cristaux d'apatite est conditionné par l'apparition d'une phase liquide à l'interface entre les deux matériaux La₂SiO₅ / SiO₂ (sur les grains de silice), et la précipitation d'une couche d'un matériau de type La₂Si₂O₇, qui est le support à la croissance des cristaux d'apatite. Par ailleurs, les électrolytes obtenus par ce nouveau procédé permettent de fabriquer en une seule étape de mise en forme l'électrolyte et l'anode support de l'électrolyseur. Aujourd'hui, des applications prometteuses dans des électrolyseurs fonctionnant à haute température pour la production massive d'hydrogène, ou dans les piles à combustible de type SOFC sont envisageables.

Émilie BECHADE - IRCER
emilie.bechade@unilim.fr

Pierre-Marie GEFFROY - IRCER
pierre-marie.geffroy@unilim.fr
<https://www.ircer.fr>

Les programmes et équipements prioritaires de recherche (PEPR) visent à construire ou consolider un leadership français dans des domaines scientifiques liés à une transformation technologique, économique, sociétale, sanitaire ou environnementale et considérés comme prioritaires au niveau national ou européen. Le CNRS est le pilote d'une majorité d'entre eux. Le PEPR Hydrogène, auquel contribue l'IRCER avec deux projets CELCER-EHT et FLEXISOC, ambitionne de décarboner l'industrie en faisant émerger une filière française pour la production massive d'hydrogène par électrolyse de l'eau.

Le premier vol transatlantique sous ballon stratosphérique

Le Laboratoire de Physique et de Chimie de l'Environnement et de l'Espace, avec son spectromètre à lasers infrarouges, était de la toute dernière mission du CNES entre la Laponie suédoise et le nord canadien.



À gauche : nacelle suspendue avec amortisseurs et panneau solaire replié, dans le hangar d'intégration. À droite : essai au sol du déploiement du panneau solaire « Medor », préalablement au vol.

Le CNES (Centre National d'Etudes Spatiales) est une agence de programme, un centre technique et un opérateur spatial. Il a organisé la campagne TRANSAT 2024, opérant pour la première fois un vol transatlantique sous ballon stratosphérique ouvert (BSO). Celui-ci a eu lieu entre Esrangle en Laponie suédoise et le territoire du Nunavut dans le nord canadien, en passant au-dessus du Groenland, soit plus de 4000 km parcourus au nord du cercle polaire Arctique. Pour remplir cette mission, le CNES a fait appel à plusieurs laboratoires de recherche réputés pour leur expertise, dont le Laboratoire de Physique et Chimie de l'Environnement de l'Espace (LPC2E — CNRS/Université d'Orléans/CNES).

Ce vol transatlantique devait démontrer la capacité des équipes scientifiques concernées à mettre en œuvre des expériences embarquées sous un BSO sur une longue durée (plusieurs jours), à l'altitude de 38-40 km où la pression est d'environ 3-4 hPa, soit 300 fois moindre qu'au sol, et la température d'environ -10°C. Le ballon d'une masse de 2,9 tonnes était équipé d'une enveloppe de polyéthylène, très fine (15 microns) pour limiter son poids. Elle a été remplie à l'hélium pour atteindre un volume de 800 000 m³ soit la taille de trois terrains de football.

UNE ALIMENTATION PAR ÉNERGIE SOLAIRE

L'objectif était de faire voler le plus gros ballon du CNES sur la plus longue distance et sur un long temps : d'habitude, un vol BSO ne dure pas plus de 30 heures à cause de la limitation en puissance électrique due aux batteries et de la direction des vents. Il fallait également que les scientifiques puissent suivre finement la progression du vol et interagir depuis le centre de contrôle à Esrangle (Suède) avec les instruments scientifiques à bord : des télécommandes pouvaient être envoyées aux instruments afin de les maintenir dans un état optimal de mesure. Ce suivi était d'autant plus complexe que le BSO survolait l'océan et les régions les plus éloignées des stations de suivi. Le CNES a donc déployé une station de réception déportée à Kangerlussuaq sur la côte

ouest du Groenland. Les liaisons bord-sol avec la charge utile, c'est-à-dire tous les instruments embarqués, ont été assurées tout au cours du vol grâce à un lien satellites Iridium, le seul système de téléphonie par satellite assurant une couverture de l'ensemble du globe. L'autonomie de vol des charges utiles de la nacelle a également été repensée avec le développement d'un système d'énergie renouvelable à bord. Ce système, dénommé Medor, a permis de déployer pour la première fois des panneaux solaires sous la nacelle, pour une puissance nominale de 1000 W. Il était installé sur un axe de rotation vertical afin de constamment pointer vers le Soleil (en permanence au-dessus de l'horizon en cette période autour du solstice d'été) et de fournir le rendement énergétique attendu par les instruments scientifiques, tout en limitant le nombre de batteries embarquées.

PLUS DE TROIS JOURS D'AVVENTURE

Le vol a eu lieu du 22 Juin 2024 à 18:55 TU (20h55 heure Europe centrale) au 26 Juin 2024 à environ 11:50 TU, c'est-à-dire qu'il a duré 3 jours et 17 h environ. Comme l'espéraient les scientifiques, la nacelle s'est bien posée en douceur sans traînée dans le Nunavut, sur le manteau neigeux au nord de l'île de Baffin. La nacelle, avec tous ses équipements et instruments, a été récupérée le samedi 29 Juin par hélicoptère et déposée 145 km plus loin, à la petite ville de Pond Inlet (ou Mittimatalik en Inuit soit "lieu d'atterrissement"). La partie supérieure de la nacelle a été démontée afin de la faire entrer par la porte d'un avion-cargo ATR et l'emmener à Iqaluit (à 900 km au sud) pour un stockage temporaire, puis vers le port de Montréal pour le voyage retour en bateau vers la France.

"conçu et réalisé par les ingénieurs pour répondre aux exigences de poids et de puissance électrique limitées"

DES OBSERVATIONS DE LA TERRE ET DE L'ESPACE

La nacelle comprenait 6 instruments scientifiques principaux, pour un poids total de 900 kg, dédiés à des études sur l'atmosphère et l'astronomie. Le NLC de la Suède a observé par caméra les nuages mésosphériques composés de cristaux de glace situés à 80 km d'altitude. Le spectromètre UV-visible OSIRIS du Canada a mesuré l'ozone et des aérosols liés aux incendies et éruptions volcaniques. Le polarimètre français COMCUBE était présent pour détecter les sursauts de rayonnements cosmiques gamma. Quant au spectromètre infrarouge non-dispersif CALASET-NG également canadien, il a été installé pour la mesure des gaz à effet de serre CO₂ et H₂O et le spectro-imageur infrarouge GLORIA-lite des allemands pour la distribution de toute une panoplie de gaz-traces* et d'aérosols.

L'instrument mini-SPECIES est, lui, un spectromètre d'absorption infrarouge à lasers *in situ* du LPC2E. Mini-SPECIES est la version réduite de l'instrument SPECIES, conçu et réalisé par les ingé-



Largage du ballon principal en vue du décollage de la nacelle.

nieurs du laboratoire pour répondre aux exigences de poids et de puissance électrique limitées pour cette mission TRANSAT. Dans SPECIES, quatre voies sont mises en œuvre, comprenant pour chacune d'elle le couplage d'un laser avec de la technique de spectroscopie d'absorption résonnante amplifiée par cavité à rétroaction optique (OF-CEAS). Les trois principaux gaz à effet de serre (GES) : dioxyde de carbone (CO₂), méthane (CH₄) et protoxyde d'azote (N₂O), et les gaz-traces réactifs comme le monoxyde de carbone (CO) et monoxyde d'azote (NO) peuvent être mesurés simultanément *in situ* en moins de 2 s.

Spécialement pour la mission TRANSAT, SPECIES a été allégé de 130 kg à 80 kg et sa consommation électrique réduite de 600 W à 300 W pour devenir mini-SPECIES, à deux voies de mesure, avec une taille de 97 cm de haut par 65 cm x 53 cm, tout en maintenant ses performances métrologiques.



Gros plan sur la nacelle ayant atterri sur l'île de Baffin.

Il a été intégré, optimisé et testé sur place à Esrangle pendant la quinzaine de jours précédente, en vue de réaliser des mesures de GES. Elles ont eu lieu en montée à partir de 24 km d'altitude, où la pression atmosphérique commence à devenir suffisamment basse pour que la spectroscopie à ultra-haute résolution soit possible. Surtout, elles sont intervenues à l'altitude maximum plafond d'environ 38-40 km pendant plus de 3 jours et demi. Des spectres ont été enregistrés et ajustés (par télécommande) en direct tout au long du vol, grâce au relais 24h/24 des 6 équipiers de mini-SPECIES, chercheurs en sciences de l'atmosphère et ingénieurs instrumentalistes. Ces espèces chimiques jouent un rôle dans le bilan radiatif de la Terre. Elles contribuent au réchauffement climatique et influencent le bilan de la couche d'ozone : le N₂O est source de NO, détruisant l'ozone. Le CO₂, lui, bloque le rayonnement infrarouge dans la troposphère, diminuant son passage dans la stratosphère et ainsi le réchauffement de celle-ci, donc la rapidité des réactions chimiques détruisant l'ozone : l'augmentation de CO₂ est bénéfique pour le maintien de la couche d'ozone !

L'étalonnage final de l'instrument a pu avoir lieu juste avant le vol, sur place. Cette étape est absolument essentielle car les appareils doivent être étalonnés d'après l'échelle mondiale de référence de surveillance des GES définie par l'Organisation Météorologique Mondiale et le GIEC.

Valéry CATOIRE - **LPC2E**
valery.catoire@cnrs-orleans.fr

Patrick JACQUET - **LPC2E**
patrick.jacquet@cnrs-orleans.fr
<https://www.lpc2e.cnrs.fr>

Propulsion spatiale : vers le remplacement des ergols toxiques

L'augmentation du trafic spatial et la volonté de développer des systèmes respectueux de l'environnement et moins coûteux poussent le monde du spatial à intégrer les ergols verts dans leurs technologies en remplacement des ergols traditionnels.

L'ERGOL HISTORIQUE

À l'heure actuelle, le remplacement des carburants toxiques des satellites et des lanceurs comme l'hydrazine dans les systèmes propulsifs est un enjeu majeur du fait de l'augmentation du trafic spatial et de la recherche de diminution des coûts. Cet ergol liquide (carburant pour le spatial), utilisé dans de très nombreux systèmes propulsifs, est hautement毒ique et classé SVHC (Substance of Very High Concern) par la réglementation européenne REACH. Ses propriétés carcinogènes et explosives demandent de prendre des précautions drastiques, telles que le port de combinaisons autonomes dédiées (SCAPE : Self-Contained Atmospheric Protective Ensemble), menant ainsi à des coûts d'utilisation élevés.

LES COMPOSÉS ENVISAGÉS POUR LE REMplacement

Deux principales alternatives peuvent être actuellement envisagées pour remplacer l'hydrazine par d'autres ergols liquides : les liquides ioniques énergétiques en solution aqueuse et l'eau oxygénée.

Les liquides ioniques énergétiques sont des sels composés généralement de cations minéraux ou organiques et d'anions généralement inorganiques. En Europe, des ergols à base de dinitramide d'ammonium (ADN) ont été développés et l'une de ces formulations, le LMP-103S, a été éprouvée en vol sur le satellite PRISMA, de l'Agence spatiale suédoise, et est maintenant commercialisée sur d'autres satellites.



Décollage d'Ariane 6

Depuis quelques années, l'eau oxygénée est considérée comme un remplaçant très prometteur également. Elle n'est pas toxique, présente des performances comparables à celles de l'hydrazine et produit des gaz chauds inoffensifs après décomposition (eau et dioxygène). L'eau oxygénée peut être utilisée comme monergol (seule) ou en tant qu'oxydant dans un système biergol pour la propulsion d'engins (lanceurs, satellites, sondes, alunisseurs...). Cet ergol peut également servir à orienter un engin spatial, alimenter des turbopompes et à tasser des ergols dans les réservoirs lors de certaines phases de vol.

Comme pour l'hydrazine, en configuration monergol, un système dit "d'allumage" doit être présent pour amorcer la décomposition de ces ergols liquides en gaz chauds. Ce sont ces gaz chauds formés et expulsés à travers une tuyère qui permettent de propulser l'engin spatial selon le principe d'action-réaction. Différentes technologies peuvent être envisagées pour produire des gaz chauds à partir d'un ergol liquide.

L'une des solutions consiste à employer ce qu'on appelle un "catalyseur hétérogène" pour effectuer cette transformation. Les molécules (qui composent les ergols) interagissent avec la surface du catalyseur pour devenir plus faciles à transformer. Par conséquent, le catalyseur permet de diminuer l'apport d'énergie nécessaire à la transformation de l'ergol liquide en gaz chauds. Son introduction dans la chambre de décomposition d'un moteur permet également d'accélérer les vitesses de réactions. Les catalyseurs



© Institut P'

Auto-allumage d'un jet de n-décan dans les gaz chauds issus de la décomposition catalytique d'eau oxygénée à 87,5 %

actuels ont des durées de vie limitées à cause des conditions drastiques auxquelles ils sont soumis lors de la décomposition de l'eau oxygénée hautement concentrée (98 %) dont la température de décomposition atteint 930 °C. Celles des ergols à base d'ADN sont quant à elles généralement supérieures à 1600 °C.

DE NOUVEAUX SYSTÈMES POUR INTÉGRER CES ERGOLS VERTS

Les chercheurs de l'Institut de Chimie des Milieux et Matériaux de Poitiers (IC2MP, CNRS / Université de Poitiers) développent des catalyseurs pour ces nouveaux ergols verts. Deux voies sont principalement étudiées au niveau catalytique. La première est l'amélioration des catalyseurs sous forme de grains ou billes (formes conventionnelles et commercialisées).

"Les progrès en impression 3D ont ouvert de nouvelles perspectives "

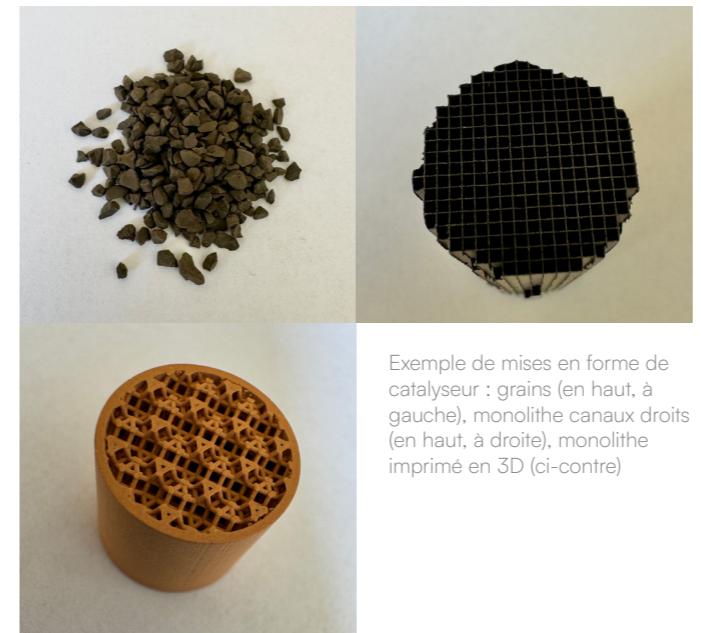
La deuxième voie consiste à utiliser des catalyseurs plus novateurs, dits monoblocs. Ils ont pour avantages de pouvoir être chargés et déchargés plus facilement dans le système. Leur manutention est aisée. Ils permettent également de s'affranchir des problèmes de frottement entre les grains qui mènent à leur détérioration. L'absence de chemin préférentiel emprunté par l'ergol est aussi un point positif lié à l'utilisation de ce type de matériaux. Il y a environ quinze ans, les catalyseurs étaient des monolithes obtenus exclusivement par extrusion (passage d'une pâte au travers d'une

filière). Cette technique permettait alors d'obtenir des structures constituées uniquement de canaux droits qu'empruntait l'ergol. Les catalyseurs préparés alors à partir de ces structures montraient globalement des activités moins élevées que dans le cas de ceux sous forme de grains ou de billes. Le manque de tortuosité des canaux ne favorisait pas un contact suffisant entre l'ergol et la phase active du catalyseur pour assurer sa décomposition chimique totale.

Les progrès en impression 3D ont ouvert de nouvelles perspectives puisque cette technologie permet d'imaginer et de concevoir des structures complexes, monolithiques, en céramique ou en métal. Elle génère un meilleur contact et donc une meilleure décomposition chimique qui produira plus d'énergie. L'IC2MP a collaboré² au développement de ce type de matériaux catalytiques pour décomposer des ergols à base de dinitramide d'ammonium.

Actuellement, des travaux sont menés conjointement avec l'institut PPRIME³ sur la production de gaz chauds à partir d'eau oxygénée concentrée pour application en propulsion spatiale. Des essais sont également en cours pour mettre ce procédé en œuvre à une échelle de plusieurs grammes par seconde, permettant la mesure des performances du système (température, vitesse caractéristique). Associés à un combustible liquide, les gaz chauds produits par décomposition catalytique de l'eau oxygénée s'auto-allument dans des conditions qui font l'objet d'une thèse de doctorat.

Ces résultats pourraient donner lieu à la conception de systèmes de propulsion adaptés aux futures missions spatiales.



Yann BATONNEAU - IC2MP
yann.batonneau@univ-poitiers.fr
Romain BEAUCHET - IC2MP
romain.beauchet@univ-poitiers.fr
Marc BELLENOUÉ - INSTITUT P'
marc.bellenoue@ensma.fr
Bastien BOUST - INSTITUT P'
bastien.boust@ensma.fr
<https://ic2mp.lab.univ-poitiers.fr/>
<https://pprime.fr/>

¹ Un catalyseur est une substance qui augmente la vitesse d'une réaction chimique. Un catalyseur hétérogène est dans une phase différente que les composés à transformer. Ici, le catalyseur est solide et les ergols sont liquides.

² dans le cadre du projet Européen H2020 Rheform

³ laboratoire CNRS en partenariat avec l'université de Poitiers et l'ISAE-ENSMA (Ecole Nationale Supérieure de Mécanique et d'Aérotechnique)

Agenda

Colloques

Le théâtre au Moyen Âge

Verbe, geste & jeu : retrouver et comprendre

<https://www.poitiers.fr/evenements/le-theatre-au-moyen-age-verbe-geste-jeu>

3 oct.

Poitiers

Biotechnocentre

36^{èmes} rencontres dans les domaines des sciences de la vie, de la santé et du bien-être en région Centre Val de Loire.

<http://www.biotechnocentre.fr/36e-colloque/>

17 - 18 oct.

Seillac

Insectes et innovation

Des insectes et des hommes pour un avenir durable.

<https://insecte-innovation.sciencesconf.org>

14 - 15 oct.

Tours

Quand les déchets résistent

Les déchets à l'épreuve de leurs acteurs, des systèmes et des matières.

<https://dvs-ws2.sciencesconf.org/>

5 - 6 nov.

Tours

Navigating a greener sky

Symposium sur les revêtements pour l'aéronautique dans un contexte de décarbonatation de l'aviation.

<https://www.asminternational.org/tss-topical-event-france/>

12 - 14 nov.

Limoges

La pièce et la plume :

La monnaie dans la littérature.

<https://www.msh-vdl.fr/actualite/colloque-la-piece-et-la-plume-la-monnaie-dans-la-litterature/>

9 déc.

Orléans



Cultivez votre curiosité

DES ÉVÉNEMENTS ET DES RENCONTRES AVEC DES SCIENTIFIQUES, OUverts à toutes et tous, à côté de chez vous.



Infos et réservations sur echappéesinattendues.cnrs.fr



MANIFESTATION - Conférence grand public sur l'eau au MOBE. Cette conférence à trois voix vous plonge dans l'eau à une échelle microscopique.

<https://www.centre-sciences.org/nos-evenements>

8 oct.

Orléans

À DÉCOUVRIR

