


microSCOOP

Un regard sur les laboratoires en Centre Limousin Poitou-Charentes

 Hors série #22 - octobre 2022

Afrique, continent de sciences

Environnement

Plastiques ostréicoles, impacts environnementaux sur les Pertuis charentais

Mathématiques

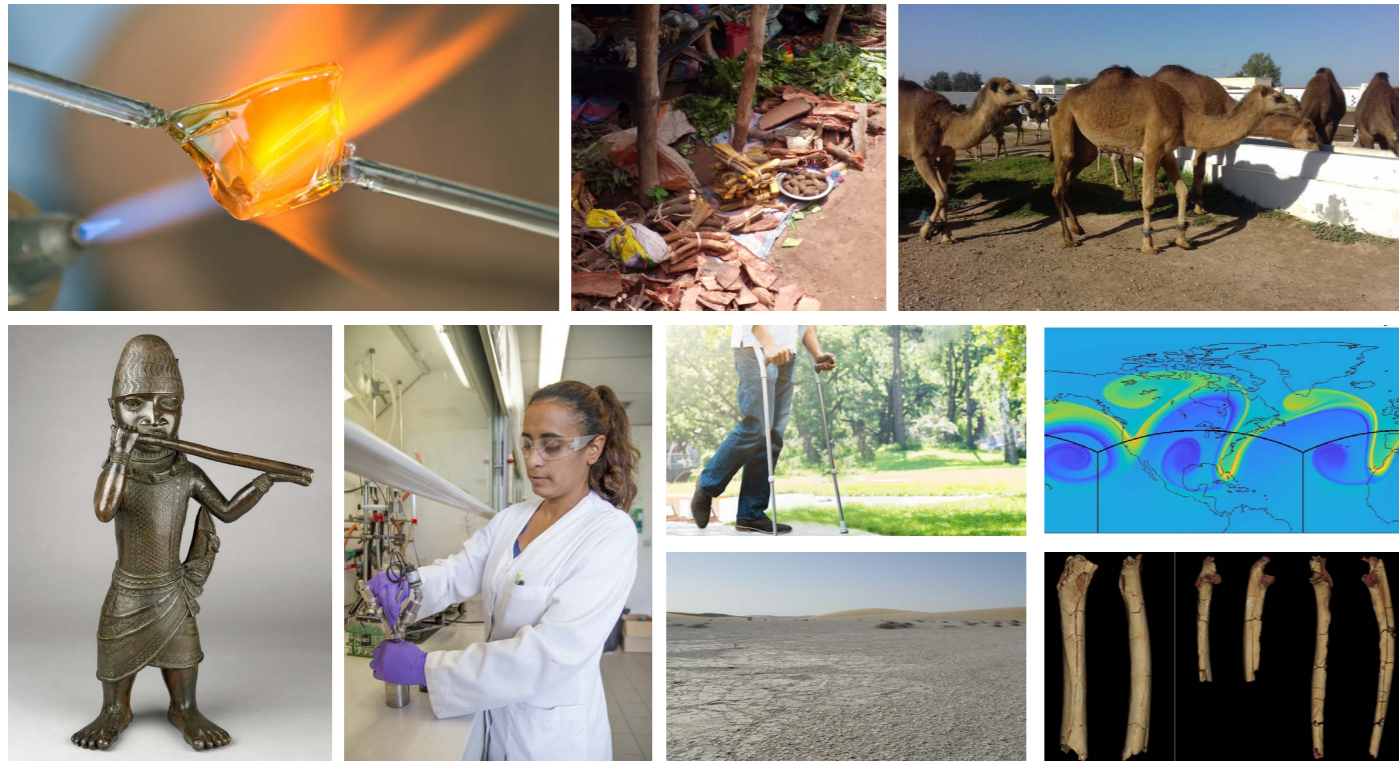
Prédire le climat : un travail de précision et de rapidité

Chimie

Ces sels qui rongent le patrimoine



cnrs



4 Afrique, continent de sciences

- Les musiques de l'Afrique à l'époque moderne
- Chamelles et brebis : devenir mère en milieu aride tunisien
- La mise en réserve de forêts africaines : quelle pertinence ?
- L'Afrique, ce trésor de géo-ressources : quels bilans et quel avenir ?
- La paléontologie franco-tchadienne, une collaboration sur le très long terme

12 Matériaux

- Des tissus de fibres de carbone pour réparer nos os ?

14 Environnement

- Plastiques ostréicoles, impacts environnementaux sur les Pertuis charentais

16 Mathématiques

- Prédire le climat : un travail de précision et de rapidité

18 Physique

- Lumière sur des plaques de verre du XVIII^e siècle

20 Chimie

- Année internationale du verre... des verres pour quelles recherches ?
- Du sucre dans les détergents
- Ces sels qui rongent le patrimoine



ISSN 1291-8083

Photo couverture : Paysage africain © Istock

CNRS Centre Limousin Poitou-Charentes
 3E, Avenue de la Recherche Scientifique
 CS 10065 45071 ORLÉANS CEDEX 2
 T 02 38 25 52 01
 F 02 38 69 70 31
 www.centre-limousin-poitou-charentes.cnrs.fr
 Contact : Communication@dr8.cnrs.fr
 @DR08_CNRS

Directeur de la publication
 Ludovic Hamon

Secrétaires de la publication
 Florence Royer
 Marine Bruneau

Création graphique/conception
 Linda Jeuffrault

Ont participé à ce numéro :
 Hana Bensalem, Matthieu Brachet,
 Jean-Renaud Boisserie,
 Sylvie Bonnamy, Tchaa Boukpepsi,
 Arno Bringer, Camilla Cavicchi,
 Guillaume Daver, Karine De Oliveira Vigier,
 Franck Guy, Sophie Hameury,
 Mohamed Hammadi, Mathieu Hebert,
 Marion Hingant, Muriel Hourlier,
 Véronique Kientzy, Gisèle Lecomte-Nana,
 Benoît Merckx, Élisabeth Nau,
 Raymond Nowak, Florian Olivier,
 Nadia Pellerin, Amélie Robert,
 Nathalie Rochet, Christelle Roudaut,
 Sylvie Servain, Lionel Simonot,
 Mouhamed Tebonou, Héléne Thomas.

Imprimeur - Prévost Offset
 Impression sur papier 100% recyclé Recyatl Matt



Éditorial

Avec l'automne, reviennent les rendez-vous, maintenant incontournables, des scientifiques avec le grand public. Ici la Fête de la Science, là la Nuit des Chercheurs ou encore les Visites insolites. À chaque site, sa manifestation avec toujours pour intérêt central de mettre en relation les scientifiques et les citoyens. À ces occasions, Microscoop est disponible pour se faire l'écho des recherches menées en Centre Limousin Poitou-Charentes.

Dans ce numéro, les travaux des laboratoires emportent le lecteur jusqu'en Afrique. Les relations inter-labos et intercontinentales sont habituelles pour le chercheur. Elles ne sont pas forcément connues du public qui, parfois, continue d'imaginer le scientifique seul sur la paillasse, dans son laboratoire. Au travers de quelques articles, l'occasion est donc donnée de se rendre compte des partenariats dans de multiples domaines. Le CNRS a dévoilé début 2022 son plan pluriannuel avec l'Afrique. Il incite à renforcer l'existant et à développer de nouvelles collaborations avec les pays du continent, dans une démarche concertée et mutuellement enrichissante. Microscoop débute dans ce numéro une première série d'articles sur ce continent. D'autres paraîtront dans les prochaines éditions.

Au travers des 28 pages, les sujets se succèdent avec la seule ambition de montrer et d'expliquer la diversité des travaux de recherche menés dans les laboratoires. Tous contribuent à faire progresser la connaissance au service de la société.

Bonne lecture à toutes et à tous.

Ludovic Hamon
 Délégué régional





Afrique, continent de sciences

En début d'année 2022, le CNRS a lancé son plan pluriannuel de coopération avec l'Afrique. Il entend ainsi renforcer et étendre ses collaborations avec les pays du continent dans une démarche concertée et mutuellement enrichissante. De nombreuses activités de recherche existent déjà entre la France et les pays africains. Des laboratoires en Centre Limousin Poitou-Charentes entretiennent et développent des collaborations avec de nombreux pays dont la liste serait longue à énumérer. Un bel exemple valant mieux qu'un long discours, Microscop met en avant des partenariats déjà très forts ou montant en puissance.

Les musiques de l'Afrique à l'époque moderne



Joueur de cor de la garde royale de l'Oba du Bénin, fin XVI^e siècle environ.
Londres, British Museum, n. Af1949,46.156
© The British Museum, Londres, Dist. RMN-Grand Palais / The Trustees of the British Museum

Dans le domaine de la musique de la Renaissance, les musicologues travaillent principalement sur des sources écrites (qu'elles soient musicales, historiques ou figuratives), ainsi que sur des objets (des manuscrits, des imprimés, des instruments, des architectures) afin de documenter les pratiques et la vie musicale dans les cours et les villes européennes. Focalisée sur le concept esthétique d'œuvre d'art musical propre de la culture des élites et européocentrique par sa nature, l'historiographie musicale a souvent négligé les traditions orales et les pratiques des minorités et des marginaux, c'est à dire des musiciens porteurs d'une culture subalterne, tels les chantres et joueurs de rue, les aveugles, les ambulants, les barbiers, etc. Ces marginaux eurent pourtant un impact significatif sur la création, la transmission et la transformation des répertoires entre les différents groupes sociaux, entre cultures et civilisations différentes au long des migrations humaines à l'époque moderne. Il y a une trentaine d'années, Franco Alberto Gallo et Roberto Leydi, respectivement professeurs d'histoire de la musique du Moyen Âge et d'ethnomusicologie à l'université de Bologne, ont publié des réflexions fondamentales pour la construction de cette perspective épistémologique. Dans *L'autre musique. Ethnomusicologie* de publiée en 1991, Roberto Leydi proposait une réflexion attentive sur la manière dont nous avons considéré la musique des autres (en termes culturels, sociaux, ethniques). Il déterminait l'oralité comme une dimension essentielle autant des traditions écrites, et suggérait d'intégrer l'approche anthropologique et ethnomusicologique à l'approche historique et vice-versa.

La Renaissance n'est pas seulement l'époque de l'humanisme, du renouvellement scientifique, culturel et artistique. Elle est aussi la période pendant laquelle se développe l'économie de l'esclavage, basée sur la traite inhumaine de femmes et hommes déportés du continent africain.

À partir du XV^e siècle, ces africaines et africains s'ajoutèrent aux minorités européennes. Ils s'intégrèrent dans la société avec leurs musiques aux rythmes singuliers, leurs danses acrobatiques, leurs instruments aux fortes sonorités. Leur impact sur la culture de cour fut remarquable autant pour ce qui concerne la production polyphonique (avec des chansons dont le rythme et la langue s'inspirent des musiques africaines) que pour les danses dont la morisque et la sarabande furent les plus populaires. Les études de Gianfranco Salvatore (Université du Salento, Italie) démontrent que la morisque était initialement une danse souple et acrobatique pratiquée par les esclaves africains amenés en Europe par les Portugais au XV^e siècle. Très appréciée des cours européennes, elle fut adaptée aux mœurs d'Occident, devenant d'abord une danse de séduction, puis un bal de cour.

Sans oublier que Vicente Lusitano (vers 1520-1561), l'un des compositeurs et théoriciens du XVI^e les plus réputés, était d'origine africaine ! Né à Olivença, alors ville portugaise, puis ordonné prêtre, il se trouve à Rome en 1551 où il est protagoniste d'une dispute sur la théorie musicale. Il enseigne à Padoue et à Viterbe, puis se rend en Allemagne dix ans plus tard et se convertit au protestantisme. Or, son premier biographe le décrit comme *pardo*, c'est-à-dire personne métisse. Un aspect que l'historiographie académique n'a fait émerger que récemment.

UNE SOURCE DE CRÉATIVITÉ

Enfin, par une soigneuse observation, on constate que la musique des africains est présente dans toutes nos sources écrites : les chroniques, les récits de voyages, les descriptions géographiques, les enluminures, les fresques, les sculptures, les traités, les documents d'archives, les effectifs de musiciens recrutés dans les cours ou dans les municipalités, les pratiques de la dévotion catholique. Au-delà de documenter l'apport africain au renouvellement de la créativité musicale de la Renaissance européenne, de nombreuses sources attestent également de la richesse musicale des populations en Afrique et du pouvoir extraordinaire que la musique assumait dans les stratégies politiques de rois d'Afrique à l'époque moderne.

Malgré l'importance de ces phénomènes de transmission et de transformation des pratiques musicales, malgré la richesse et la diversité des sources, l'état de l'art sur la musique en Afrique et hors de l'Afrique reste fragmentaire. C'est donc sur la base de cette étonnante lacune épistémologique que le Centre d'études supérieures de la Renaissance à Tours (CESR UMR7323 – CNRS/Université de Tours) a organisé son colloque annuel d'études humanistes. Cette démarche visait ainsi d'une part à sensibiliser les spécialistes de l'époque moderne à l'histoire globale de la musique, de l'autre à réfléchir sur le rapport entre décolonisation et recherche, à remettre en question le savoir académique, à promouvoir l'implication de chercheurs africains.

La rencontre de Tours a posé les bases d'un nouveau groupe de recherche de la Société Internationale de Musicologie qui permettra d'intensifier la collaboration de jeunes chercheurs d'Afrique avec des groupes de recherche déjà existants tels : Ricercar - Early Music Lab, qui est depuis 1992 le programme de recherche en musicologie du CESR à Tours ; Echos. Sound Ecosystems in Travelogues de l'Université de Padoue qui travaille sur la reconstruction des écosystèmes sonores

des populations et civilisations extra-européennes (1400-1800) ; le Study Group on Global History of Music de la Société Internationale de musicologie consacré à l'histoire globale de la musique ; le Study Group on African Musics de l'International Council for Traditional Music ; Africana Studies, le regroupement disciplinaire de la Renaissance Society of America qui soutient les travaux sur l'époque moderne.

Camilla CAVICCHI < CESR
cavicchi@univ-tours.fr
<https://cesr.univ-tours.fr/>
<https://ricercar-tours.fr/>

Chamelles et brebis : devenir mère en milieu aride tunisien



Troupeau de chamelle laitière conduite à l'abreuvoir. Élevage de l'Institut des Régions Arides de Médenine.

La mise en place du comportement maternel dépend d'événements physiologiques complexes liés à la parturition. Son expression varie selon les espèces mais ce qui caractérise les ruminants, c'est la maturité du nouveau-né, extrêmement précoce, et la rapidité avec laquelle un lien d'attachement s'établit entre la mère et son jeune. C'est à la naissance, en l'espace de quelques heures, que se joue le devenir de la relation mère-jeune. Les femelles de ces espèces présentent un certain nombre de points communs comme l'attrait temporaire pour les liquides fœtaux, l'intérêt pour le nouveau-né et son léchage, et surtout sa reconnaissance qui conduit à ce que les soins maternels soient exclusivement dirigés vers le petit de la mère biologique.

Le comportement des mères est alors un facteur déterminant pour la survie du nouveau-né, parce qu'elle seule lui fournit le lait. L'expertise acquise en ce domaine par l'équipe Neuroéthologie et Cognition Sociale, de l'unité Physiologie de la Reproduction et des Comportements (PRC UMR7247 – CNRS/INRAE/Université de Tours/IFCE) a permis une collaboration fructueuse avec le Laboratoire d'Élevage et Faune Sauvage de l'Institut des Régions Arides de Médenine qui voulait caractériser le comportement maternel de deux animaux emblématiques du sud tunisien : la chamelle, et la brebis D'man.

Il s'agissait de comprendre chez l'une, comment remédier aux aberrations comportementales, et chez l'autre, en quoi la relation mère-jeune influençait la survie du petit.

LE DROMADAIRE, VAISSEAU DU DÉSERT

Connu par sa résistance aux conditions climatiques arides sévères, le dromadaire a été utilisé par les peuples nomades comme moyen de transport, permettant de tracer les routes de l'encens et de la soie, et justifiant ainsi son surnom arabe de "vaisseau du désert" (*saffinat as-Sahra*). Il est actuellement élevé pour la course, le tourisme, mais aussi pour la production de cuir, de viande et plus récemment de lait. Son activité sexuelle est saisonnière, et se produit en général durant la période de basses températures et de pluies abondantes.

Après treize mois de gestation, la chamelle s'écarte du troupeau et ne donne naissance qu'à un seul petit ; elle pourra l'allaiter pendant un an. L'intérêt du dromadaire pour la production laitière a soumis l'animal à de nouvelles contraintes, d'autant plus que la présence du chamelon est nécessaire pour assurer la descente de lait, et donc permettre la traite. Curieusement, on sait peu de chose sur son comportement maternel. Nous avons observé des chamelles de la parturition jusqu'à sept jours plus tard. Quelques heures avant l'apparition de la poche des eaux, la chamelle se montre agitée, se couche et se redresse. Même en bâtiment, elle cherche à s'éloigner de ses congénères et à s'isoler. Les primipares sont généralement plus agitées et ont plus de difficultés à expulser leur petit que les multipares. À leur naissance, les femelles se montrent plus vigoureuses que les mâles en se levant et trouvant la mamelle plus rapidement. Si l'attrait pour le nouveau-né est quasi immédiat, le comportement des mères est atypique. Contrairement aux autres ruminants, la chamelle ne lèche nullement son petit, mais se contente de le flairer et d'émettre des vocalisations. Assez passive, elle ne guide pas son chamelon à la mamelle et c'est donc au nouveau-né de se débrouiller seul afin de trouver les trayons. L'activité vocale et de flairage est moindre chez les femelles primipares reflétant leur inexpérience maternelle et si elles allaitent leur chamelon plus tardivement, cela est sans conséquence pour le petit. C'est sans doute à travers ces échanges sensoriels que s'établit l'attachement mère-jeune. Il nous reste donc à le démontrer.

UNE CHAMELLE PAS TOUJOURS MATERNELLE

Parfois des aberrations comportementales s'expriment, notamment chez les chamelles subissant des parturitions longues et douloureuses. Ces mères blatèrent bruyamment, cherchent à s'éloigner de leur nouveau-né, le rejettent s'il persiste à s'approcher d'elles, souvent violemment à coups de pattes et de morsures ; un comportement fatal pour le jeune.



Troupeau de brebis D'man et leurs agneaux à la ferme expérimentale de Chenchou située à environ 20 km à l'Ouest de Gabès.

Il est toutefois possible d'inverser le phénomène et d'assurer l'acceptation des chamelons, en isolant la mère et son nouveau-né dans un enclos de confinement éloigné du troupeau. Des mesures qui restreignent les coups de pattes et empêchent la mère de mordre. La collecte de lait après injection d'ocytocine et le biberonnage du chamelon, mais aussi l'incitation du petit à se diriger vers la mamelle et la récompense alimentaire offerte à sa mère chaque fois qu'elle se laisse faire, concourent à rétablir le comportement maternel. Après trois jours, les agressions et l'agitation vocale ont totalement disparu, le chamelon est accepté par sa mère. Les mécanismes responsables de cette acceptation sont inconnus mais la méthode de contention associée aux injections d'ocytocine, hormone dite "de l'amour", pourraient jouer des rôles complémentaires.

UNE BREBIS PROLIFIQUE ET INSENSIBLE À LA SAISON

La brebis D'man, d'origine algéro-marocaine, forme la base de l'élevage sédentaire des oasis tunisiennes. Parfaitement adaptée à ses conditions climatiques elle présente deux caractéristiques importantes :

- une forte prolificité, donnant fréquemment naissance à des jumeaux et triplés ;
- une activité de reproduction non saisonnée, contrairement à la vaste majorité des races ovines.

Si cela offre un intérêt pour les éleveurs, ces traits sont également une faiblesse potentielle. En effet, une telle prolificité fragilise les agneaux de petite taille et de portée nombreuse : ils sont moins vigoureux, accèdent plus difficilement à la mamelle, ont plus de difficultés à maintenir une température corporelle optimale, et sont plus susceptibles de dépérir, surtout en hiver. Les brebis D'man sont cependant d'excellentes mères, et développent une relation d'attachement avec leur progéniture, quel qu'en soit leur nombre.

Chez les agneaux, le lien avec la mère est plus ténu chez les triplés et les quadruplés que chez les simples et les jumeaux, et ceux qui tardent trop à construire ce lien sont plus susceptibles de mourir. À ce niveau, le poids de naissance joue un rôle plus important que la taille de la portée. Alors que la saison n'affecte pas le comportement des mères, en revanche les agneaux nés au printemps sont les plus vigoureux et les plus lourds, l'hiver entraînant une tendance inverse. C'est d'ailleurs en hiver qu'on observe la plus forte mortalité (jusqu'à 23%). Ce sont sans nul doute les conditions environnementales qui influencent la croissance fœtale, le comportement néonatal, et la survie de l'agneau. Les mères en sont moins tributaires. Malheureusement, la présence concomitante de nombreux facteurs de risque et de causes variées, rend à ce jour la maîtrise de la mortalité juvénile difficile. Cette situation n'a pas encore permis d'offrir aux éleveurs de solutions satisfaisantes.

Raymond NOWAK < PRC
raymond.nowak@inrae.fr

Mohamed HAMMADI < IRA
mhammadi70@gmail.com

<http://www6.val-de-loire.inra.fr/umrprc-ethologie-neurobiologie>

<http://www.ira.agrinet.tn/index.php/laboratoires-des-recherches>

La mise en réserve de forêts africaines : quelle pertinence ?

Depuis 2020, les laboratoires CITERES à Tours (UMR7324 – CNRS/Université de Tours) et LaRBE à Lomé (Togo) ont engagé une étude sur une aire protégée du Centre-Togo, la réserve de faune d'Abdoulaye. Ces recherches questionnent la pertinence de cette réserve, en termes de services écosystémiques. Ils correspondent aux services que les écosystèmes rendent aux sociétés, en d'autres termes aux apports de la nature pour les êtres humains. Ils peuvent être positifs (synonymes de bienfaits) mais aussi négatifs (synonymes de méfaits : exemple des dégâts causés par la faune aux cultures). Quatre catégories de services se distinguent :

- les services d'approvisionnement procurant des biens matériels (bois de construction...),
- les services de régulation contribuant à l'assurance d'un environnement agréable (cycle de l'eau ou du carbone...),
- les services culturels concernant les bienfaits immatériels (aménités, loisirs...),

- les services de support permettant aux trois précédents de se maintenir (diversité génétique, habitats pour les espèces...).

Pour conduire ces recherches, la méthodologie associe relevés de terrain (inventaire des espèces végétales), analyse d'images satellites (pour connaître l'occupation des sols et ses évolutions), entretiens avec des acteurs locaux (chefs de canton, chefs de village, conservateur, ONG, Association villageoise de gestion des aires protégées) et enquêtes auprès de villageois résidant à proximité de la réserve. La plupart de ces riverains sont issus de différentes vagues migratoires. Ils sont agriculteurs surtout, commerçants ou chasseurs. À l'échelle de la préfecture de Tchamba (d'une superficie de 22 km²), où se situe la réserve, on comptait, en 2010, 131 674 habitants dont 83 % de ruraux. Les recherches menées partent d'un constat : les services écosystémiques ont été "hiérarchisés" par les pouvoirs publics mais l'absence



La transhumance, une menace pour la réserve de faune d'Abdoulaye. En l'absence de site de pâturage, malgré l'interdiction, la réserve est fréquemment parcourue par des éleveurs et leurs troupeaux, prenant comme prétexte la recherche de points d'eau pour l'abreuvement des bêtes. Au passage, non seulement leurs animaux broutent l'herbe et les jeunes plants, mais les éleveurs n'hésitent pas à élaguer, voire étiéer aussi certaines plantes pour les nourrir.

d'une réelle prise en compte de ces populations riveraines constitue un frein pour le fonctionnement et la gestion de la réserve.

INCLURE LES POPULATIONS DANS LES RÉFLEXIONS

Au Togo, l'idée de création des aires protégées date de l'époque coloniale. En 1933, le pays a pris part à la conférence pour la protection de la faune et de la flore en Afrique, à Londres. Il s'est ensuite engagé dans la création de ces aires, afin de lutter contre l'érosion de la biodiversité. Ceci a abouti à la création de la réserve de faune d'Abdoulaye en 1951, sur 30 000 ha. Les populations ont alors été exclues, sans prendre en compte les services qu'elles en tiraient et bien sûr sans proposition de solutions de rechange, comme c'est le cas pour la plupart des aires protégées. La gestion de la réserve s'est orientée vers la protection stricte et la répression. L'objectif était de sauvegarder les îlots de forêts denses sèches et les galeries forestières contre les aléas naturels et la pression anthropique. Mais la réserve fut envahie à deux reprises, de 1974 à 1982 par les propriétaires terriens, puis de 1990 à 2003, à la suite des troubles socio-politiques, par des populations allogènes expulsées du sud-Togo. Il semblait dès lors nécessaire, pour les scientifiques, de s'interroger sur la pertinence de cette réserve et d'identifier notamment les services bénéficiant aux villageois aujourd'hui installés en dehors de ses limites.

Une première campagne de terrain fut conduite en 2021 dans le cadre d'un projet financé par la Maison des Sciences de l'Homme Val de Loire, permettant de concrétiser la collaboration franco-togolaise. Des données (rapports, cartes, données statistiques) ont ainsi été collectées et les premiers entretiens et enquêtes, réalisés. Ils ont été poursuivis en 2022, lors d'une seconde campagne dédiée surtout aux relevés de végétation. Les 294 villageois enquêtés dans 18 villages identifient une diversité de services, ce pour les quatre catégories précitées. Pour les services d'approvisionnement par exemple, il s'agit surtout de ressources alimentaires (plus de 50 % des réponses), ce qui témoigne de l'importance vitale de la réserve. Pour les services de régulation, les villageois mentionnent, par ordre décroissant d'importance : la régulation du climat, l'atténuation des vents, la purification de l'air, la séquestration du carbone, la lutte contre les inondations, la lutte contre

l'érosion, l'amélioration de la fertilité des sols et l'amélioration de la pollinisation. Une distinction spatiale apparaît dans la délivrance de ces services, entre la périphérie, la zone tampon et le cœur de la réserve. En l'occurrence, la séquestration du carbone serait plus importante dans le cœur, quand la collecte du bois de chauffe se fait, elle, surtout en périphérie, puisque soumise à autorisation dans la zone tampon et interdite dans le cœur. Surtout, ces services apparaissent au centre de conflits entre gestionnaires et villageois mais aussi entre villageois eux-mêmes. On note par ailleurs un décalage entre les directives nationales et les réalités locales, l'ambiguïté du statut de la réserve et le manque de moyens financiers et d'appuis techniques.

Le projet a aussi été l'occasion de renforcer les liens entre les deux laboratoires partenaires et de constituer un réseau autour de la question des aires protégées. Lors d'un séminaire organisé en 2021, sont intervenus des chercheurs travaillant sur d'autres aires protégées du Togo. Ils ont témoigné eux aussi de la complexité de les mettre en place, de concilier pratiques locales et préservation de la nature. Plusieurs problèmes ont été pointés : la délimitation de ces aires, avec une différence entre des découpages théoriques et la réalité sur le terrain, le manque de moyens financiers pour assurer la surveillance et la précarité des populations riveraines pratiquant une agriculture de subsistance. L'importance de proposer des solutions de rechange est alors ressortie. Certaines existent mais elles peuvent elles aussi compromettre la préservation de la nature, comme les cultures industrielles ou l'écotourisme. Plutôt que s'orienter vers la répression, l'intégration des populations paraît être la meilleure solution, étant entendu que la concertation doit être conduite en amont de la définition du plan d'aménagement, pour une véritable gestion participative. Elle doit aussi prendre en compte le poids des héritages, dont l'histoire des aires protégées, marquée au Togo par une gouvernance particulièrement répressive.

Un second séminaire, en 2022, a élargi le réseau de chercheurs et, par là même, la réflexion, puisqu'il s'est centré sur les ressources forestières au centre de tensions, partagées entre des désirs de préservation et une pression qui s'exerce pour répondre à des besoins souvent vitaux. Les exemples ont été pris sur des terrains africains, au Togo,



La réserve de faune d'Abdoulaye, « une boîte à pharmacie » pour les populations locales. Écorces, feuilles, racines, fruits, gousses... sont prélevés frauduleusement dans la réserve à des fins médicinales, pour un usage familial ou pour la vente sur les marchés locaux.

en République du Congo, au Gabon et au Sénégal, montrant l'importance des forêts pour les sociétés locales. Elles offrent des biens matériels (bois et produits forestiers non ligneux) et constituent aussi des réserves foncières, cédant la place à l'agriculture et aux villes qui ne cessent de s'étendre. Pourtant, la préservation des forêts est un enjeu

En 2020 une coopération a débuté, à l'initiative de Mouhamed Tebonou, aujourd'hui doctorant à l'Université de Tours. Après une maîtrise de géographie physique à l'Université de Kara (Togo) et un Master Environnement Territoire Paysage à l'Université de Tours, il a souhaité se lancer dans une thèse de doctorat en France mais en bénéficiant aussi d'une co-direction togolaise. Il a ainsi sollicité un maître de conférences de l'Université de Lomé, au LaRBE. En France, une professeure de l'INSA Centre-Val de Loire à CITERES et une ingénieure de recherche de l'Université de Tours, également à CITERES ont accepté de co-diriger et de co-encadrer la thèse en apportant leurs connaissances et compétences en géographie de l'environnement, sur les paysages et leurs dynamiques ainsi que les services écosystémiques.

L'Afrique, ce trésor de géo-ressources : quels bilans et quel avenir ?



Installation de panneaux solaires en Afrique

Outre la qualification de « berceau de l'humanité » associée au continent africain, il est important de souligner sa richesse en termes de ressources minérales. Notamment la présence d'une grande diversité de matières premières écoresponsables qui place l'Afrique au cœur des réserves stratégiques du monde. Le laboratoire IRCER (UMR7315 – CNRS/Université de Limoges) a préservé son ouverture et ses collaborations avec de nombreux pays d'Afrique francophone depuis plus de 20 ans. Une thématique forte et fédératrice concerne « la valorisation des matières premières naturelles de l'Afrique », ce qui permet de s'inscrire dans une démarche durable et vertueuse avec des applications aussi bien dans les domaines de l'habitat, du traitement des eaux que ceux de l'énergie et de la santé.

DES DÉVELOPPEMENTS COLLABORATIFS DE MATÉRIAUX

Les crises mondiales récentes, climat, Covid-19 et guerres au Sahel et en Ukraine, ont exacerbé les difficultés des pays africains à assurer la stabilité socio-économique des populations. La Confédération des nations unies pour le commerce et le développement (Cnuced) préconise en effet de repenser la diversification des économies africaines.

majeur, sur le plan environnemental bien sûr, dans le contexte actuel du changement climatique, comme sur le plan économique à l'heure de leur valorisation touristique.

Mouhamed TEBONOU < CITERES
mouhamedtebonou@gmail.com

Amélie ROBERT < CITERES
amelie.robert@univ-tours.fr

Tchaa BOUKPESSI < UNIVERSITÉ DE LOMÉ, LARBE
tchaa.boukpeSSI@gmail.com

Sylvie SERVAIN < CITERES
sylvie.servain@insa-cvl.fr

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

Il s'agit notamment de miser sur les technologies et développement en lien avec une transformation / valorisation locale des matières premières. Au niveau du laboratoire IRCER, des travaux collaboratifs menés depuis plusieurs décennies sont en parfaite adéquation avec cette orientation. En effet, plusieurs sites de géo-ressources ont pu être qualifiés à travers des thèses de doctorat, des stages scientifiques postdoctoral et/ou chercheur. Notamment, des argiles fusibles et réfractaires ont été identifiées en République de Centre Afrique et au Sénégal pour la formulation de matériaux de construction en terre cuite et de céramiques réfractaires (parois de fours, creusets pour la métallurgie extractive, etc.). Des exploitations industrielles de type PME ont pu être développées par ce biais. De même, des prix scientifiques ont été obtenus au cours de colloques et congrès internationaux, le plus récent concernait le prix Robert J. Reynold Jr du meilleur projet décerné par la Clay Mineral Society (CMS). Le thème traité était en lien avec l'utilisation d'une argile kaolinitique et de déchets organiques pour la production de microfiltres céramiques permettant de rendre potables les eaux de puits au Cameroun.

Dans l'optique de cette gestion vertueuse de géo-ressources, les latérites et argiles latéritiques ont suscité un vif intérêt pour la consolidation à température modérée. Une nouvelle classe de géomatériaux a été mise au point : les matériaux « géomimétiques ». Cet exemple illustre la complémentarité dans cette collaboration scientifique et la synergie qui en découle. En effet, la transposition du processus de formation des concrétions latéritiques dans les sols, à l'échelle géologique (centaines d'années), à l'échelle laboratoire (2 à 7 jours) a été conduite avec succès. Ainsi le fer contenu dans les argiles latéritiques a été partiellement dissout grâce à des solutions d'acides biosourcés (substances humiques) ou résultant de déchets (industrie des phosphates). Par la suite, l'ajout de chaux permet de redistribuer ce fer et d'assurer la consolidation entre les grains solides. Un protocole accessible et réalisable dans les pays de la zone tropicale et une solution qui intègre un recyclage efficient. Une enveloppe Soleau a été déposée en lien avec ces matériaux « géomimétiques ».

Des formulations innovantes de géomatériaux à base d'argiles latéritiques ou de latérites, combinées avec des substances organiques biosourcées ont été mises au point.

LE TRAITEMENT DES EAUX

Le stress hydrique est de plus en plus marqué en Afrique, notamment à cause de la pollution des eaux par les industries d'extraction de minerai, du textile et pharmaceutique. Des alternatives durables et accessibles aux populations rurales ont été étudiées. Une fois de plus, la sélection de la matière première argileuse est déterminante pour minimiser le coût énergétique de cuisson tout en maximisant les performances finales (résistance mécanique, perméabilité et durée de vie). Cette stratégie qui s'apparente au concept « LowTech » trouve une résonance pertinente avec les cultures locales. Ainsi par exemple des déchets verts ont été incorporés comme agents porogènes : des coques d'arachides au Burkina Faso, des peaux de banane plantain en RCA, de l'amidon de manioc et des os de bovins au Cameroun... Nous avons pu modifier des halloysites pour le captage de polluants médicamenteux en solution. Comparativement à des solutions commerciales très complexes et relativement coûteuses, l'utilisation de l'halloysite modifiée est plus vertueuse et offre la possibilité d'un recyclage dans des formulations céramiques par exemple.

UN RYTHME DIFFÉRENCIÉ D'AVANCEMENT

Force est de constater que malgré l'ampleur des études déjà menées en collaboration avec des pays d'Afrique, la concrétisation locale a beaucoup de mal à être effective. Les raisons qui pourraient justifier cet état quasi statique concernent :

- les priorités affichées localement ;
- le manque d'équipements ;
- la complexité des administrations et l'instabilité géopolitique potentielle ;
- le manque d'initiatives entrepreneuriales ;
- la vision biaisée ou complexée des possibilités locales comparativement à la situation des pays occidentaux.

La paléontologie franco-tchadienne, une collaboration sur le très long terme



Photo de terrain dans le désert du Djourab où sont localisés les sites fossilifères ayant livrés les restes postcrâniens de *Sahelanthropus tchadensis*.

Certes, ce sont des justifications plausibles, mais comment expliquer le gap constaté très souvent entre pays d'Afrique francophone et pays d'Afrique anglophone ? En effet, le Nigéria qui est surnommée « la petite Amérique » ou encore « la Chine africaine » a démontré une forte capacité de structuration et d'autonomie. Il en est de même pour l'Afrique du Sud, qui est pratiquement équivalente à certains pays européens. Le Kenya, le Ghana, etc. sont autant d'exemples de pays anglophones d'Afrique qui s'élèvent progressivement sur la scène internationale.

Au niveau des pays francophones, la zone du Maghreb se développe de plus en plus, grâce à sa localisation stratégique aux portes de l'Europe. Cependant, la concentration des moyens voulus par les instances occidentales au niveau du Maghreb avec des offres de formations et des moyens techniques importants (hub pour l'Afrique francophone) ne rencontre pas le succès escompté. Cette tendance met en lumière le besoin d'adhésion et de considération préalable des pays à toute démarche de mutualisation.

UN (R)ÉVEIL DE L'AFRIQUE : DES GÉO-RESSOURCES POUR LA PRODUCTION D'ÉNERGIE VERTE

Globalement, un biais de moyens persiste entre certains pays en Afrique, ce qui freine considérablement les développements en lien avec la valorisation et la gestion des géo-ressources. Ces biais témoignent également d'opportunités et d'une nécessité de se structurer. A titre d'exemple, l'Afrique apparaît comme un pôle stratégique pour la production d'hydrogène vert. Un bel espoir pour la relance et l'essor socio-économique et environnemental en Afrique qui se replacerait au cœur de la stratégie des énergies décarbonées. Les coûts de production d'hydrogène vert en Afrique seraient inférieurs à 2 \$/kg d'ici à 2030.

Gisèle LECOMTE-NANA < IRCER
gisele.lecomte@unilim.fr
<https://www.ircer.fr>

"Grab the fossils and run". Cette maxime prononcée par un paléontologue illustre visait à stigmatiser le rapport malheureux de certains de ses condisciples aux ressources fossilifères du continent africain (et des autres, d'ailleurs). Pour ceux-là, seule la découverte et sa publication compteraient, tout le reste important peu. C'est exactement l'esprit inverse que l'équipe de PALEVOPRIM (UMR7262 – CNRS/Université de Poitiers) cultive avec ses partenaires tchadiens depuis le milieu des années 1990.

Afin de reprendre les travaux pionniers du regretté Yves Coppens, Michel Brunet a créé la Mission Paléanthropologique Franco-Tchadienne (MPFT) en 1994 avec l'aide des autorités tchadiennes et de la coopération française. Les premières missions, menées notamment avec l'aide du géographe Alain Beauvilain, en poste auprès de l'Am-



Modèles numérisés en 3D des trois os des membres de TM 266 attribués à *Sahelanthropus tchadensis* (à gauche, le fémur en vues postérieure et médiale ; à droite, les deux ulnae en vues antérieure et latérale).

bassade de France à N'Djaména, ont rapidement permis de découvrir des restes fossiles pliocènes de nombreux vertébrés, en particulier ceux d'*Australopithecus bahrelghazali*, daté à environ 3,5 Ma, puis en 2001, de *Sahelanthropus tchadensis*, plus ancien représentant connu de l'humanité à 7 Ma. Un vrai coup de tonnerre dans un microcosme paléontologique habitué à considérer le rift est-africain comme lieu d'émergence de l'humanité.

S'ENGAGER DANS LA FORMATION

La paléontologie, le Tchad ne connaissait pas, ou très peu, en 1994. Au lieu de « prendre les fossiles et courir », le laboratoire de Poitiers s'est donc engagé dans la formation doctorale des premiers paléontologues du pays, en parallèle de celle de jeunes français. Ce qui a d'ailleurs donné lieu à des fins de thèse mémorables, quand deux thésards, un tchadien et un français, soutenaient le même jour. De quoi faire naître des amitiés scientifiques très durables !

Les efforts de la MPFT ont également porté sur la création d'un lieu de collection pour accueillir ce précieux patrimoine tchadien. L'appui du Ministère de l'Europe et des affaires étrangères a permis de faire naître un tel bâtiment au Centre National de la Recherche pour le Développement. En parallèle, l'Université de N'Djaména s'est dotée d'un département de paléontologie pour accueillir les deux premiers paléontologues formés en 2001 et 2002. Aujourd'hui, ils sont quatre docteurs tchadiens, trois en paléontologie et un en sédimentologie (formé à l'Université de Strasbourg en collaboration avec Poitiers). Ils sont accompagnés par des personnels d'appui à la recherche d'une grande technicité, également en partie formés à Poitiers.

Gouvernée par une convention entre l'université de Poitiers, le CNRD et l'Université de N'Djaména, la collaboration scientifique ne s'est jamais interrompue, des missions communes ayant lieu aussi souvent que possible. Surtout, de nombreux fossiles découverts dans les années 2000 sont en cours d'étude par l'équipe franco-tchadienne. Sa dernière publication en date est parue dans Nature le 24 août dernier. Il s'agit de la description et de l'analyse de trois os des membres, un fémur et deux ulnae, attribués à *Sahelanthropus tchadensis*. Avec une question en jeu : quel était le mode de locomotion des plus anciens représentants connus de l'humanité ?

Sahelanthropus a été initialement décrit et attribué au rameau humain en 2002 sur la base de quelques autres spécimens crânio-dentaires, dont un crâne surnommé Toumaï, découverts à Toros-Ménalla dans le désert du Djourab. Les os des membres décrits dans la nouvelle publication appartiennent le plus vraisemblablement à la même espèce que le crâne. En revanche, si ces différents éléments proviennent de la même localité, on ne sait pas s'ils représentent plusieurs ou un seul individu.

L'ensemble des caractères observables sur ces os assez mal préservés a été analysé. Pris séparément, aucun de ces caractères ne permet de proposer une interprétation catégorique du matériel. Par contre, pris tous ensembles, ces caractères aboutissent à une interprétation bien plus parcimonieuse que toute autre hypothèse.

Au cours de ses déplacements, *Sahelanthropus* combinait une bipédie habituelle – le plus probablement dans ses déplacements au sol mais également dans les arbres – à une quadrupédie arboricole assurée par des prises fermes de la main. Celle-ci différait clairement de la quadrupédie pratiquée par les gorilles et les chimpanzés qui prennent appui sur le dos de leurs phalanges. Parmi diverses implications, ces résultats renforcent donc l'idée d'une phase ancienne de l'évolution humaine combinant bipédie et quadrupédie, suggérant que notre ancêtre commun avec la chimpanzette ne ressemblait ni aux humains, ni aux chimpanzés et bonobos actuels !

L'équipe franco-tchadienne va poursuivre ses missions et ses recherches. Ensemble, les anciens camarades de thèse forment une nouvelle vague d'étudiants entre Poitiers et N'Djaména. Certains sont tchadiens, d'autres sont français, d'autres enfin sont éthiopiens. Histoire de faire essaimer en Afrique orientale l'esprit de collaboration sans frontières, sans Nord et sans Sud qui préside à leurs recherches...

PALEVOPRIM développe ses recherches dans bien d'autres pays d'Afrique depuis les années 1980. Cameroun, Nigéria, Égypte, Libye : certains terrains sont devenus moins actifs avec le temps ou les contraintes géopolitiques. Avec la même approche de construction commune et collaboration ancrée localement que pour le Tchad, l'UMR poitevine développe aujourd'hui ses principales missions africaines au Maroc, au Kenya et en Éthiopie. À titre d'exemple, son programme Omo Group Research Expedition s'appuie ainsi sur plus de vingt ans de collaboration avec les autorités éthiopiennes et le Centre Français des Études Éthiopiennes à Addis Abeba pour mener des recherches sur l'évolution biologique et environnementale au Plio-Pléistocène, former des étudiants (quatre thèses en cours) et faire de la médiation auprès du public éthiopien (galerie de paléontologie et préhistoire du National Museum of Ethiopia). Les collègues de N'Djaména participent bien entendu aux fouilles, aux analyses des fossiles et à l'encadrement des étudiants !

Jean-Renaud BOISSERIE < PALEVOPRIM
jean.renaud.boisserie@univ-poitiers.fr

Guillaume DAVER < PALEVOPRIM
guillaume.daver@univ-poitiers.fr

Franck GUY < PALEVOPRIM
franck.guy@univ-poitiers.fr

<http://palevoprims.labo.univ-poitiers.fr>

Des tissus de fibres de carbone pour réparer nos os ?

Les matériaux carbonés ont démontré leur intérêt dans de nombreux domaines. De nouveaux patchs innovants permettent aujourd'hui d'envisager l'utilisation d'un tissu de fibres de carbone en régénération osseuse mais également lors de traitements de pathologies infectieuses en chirurgie orthopédique.

Il y a 10 ans, une activité de recherche sur les matériaux conçus pour interagir avec les systèmes biologiques, les "biomatériaux", a émergé au Laboratoire Interfaces, Confinement, Matériaux et Nanostructures (ICMN, UMR7374 – CNRS/Université d'Orléans) avec pour objectif le développement de nouveaux biomatériaux à base de carbone pour des applications en chirurgie orthopédique.

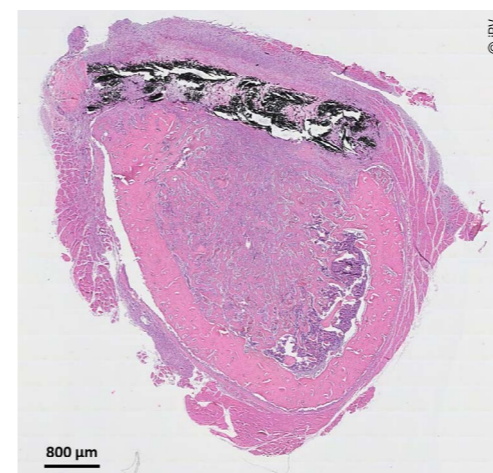
La synthèse de nouveaux biomatériaux destinés à la régénération osseuse nécessite une approche pluridisciplinaire avec des savoir-faire en science des matériaux et en biologie du vivant, d'où la mise en place pour ce projet de nombreuses collaborations au sein de la Région Centre-Val de Loire* mais également à l'échelle nationale**.

UN BIOMATERIAU INNOVANT

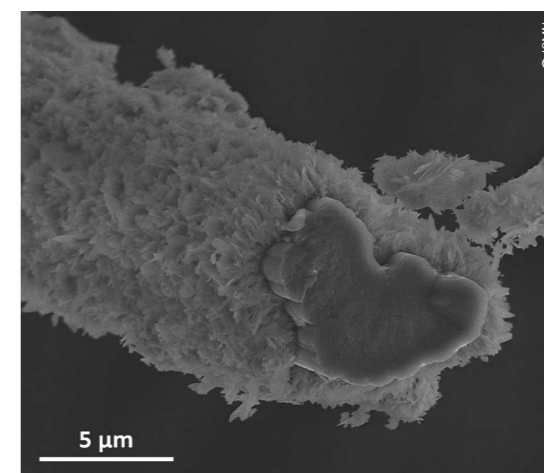
Les activités de recherche de l'ICMN sont fortement axées sur les matériaux carbonés. La recherche d'un matériau carboné biocompatible, bio-inerte et surtout flexible (pour pouvoir être apposé en tant que patch osseux) a orienté le laboratoire vers les tissus de fibres de carbone activés. En plus, des caractéristiques précitées, ils ont le très grand avantage de posséder une architecture poreuse multi-échelles qui, d'un point de vue biologique, va permettre d'une part, la circulation des fluides biologiques et favoriser l'adhésion et la prolifération cellulaire et d'autre part, l'adsorption et la restitution des molécules d'intérêt biologique ou médicamenteuse.

Afin d'apporter de nouvelles propriétés biologiques et thérapeutiques à ces tissus carbonés, un revêtement de phosphates de calcium (apatites) a été déposé à la surface des fibres. Le grand atout des apatites est de posséder une très grande similarité de structure et de composition chimique avec la phase minérale de l'os. En conséquence, ils sont très utilisés en chirurgie dentaire et osseuse en tant que substituts osseux ou revêtements améliorant les propriétés biologiques des matériaux supports, telles que la bioactivité (favorise le développement cellulaire) et l'ostéointégration (bonne interaction entre le tissu osseux et le biomatériau). Un procédé d'élaboration de chimie douce, la sono-électrodéposition, a été mis en œuvre pour déposer l'apatite à la surface des fibres de carbone.

Cette technique consiste en une co-précipitation sous ultra-sons d'ions calcium et d'ions phosphate à la surface du tissu carboné. Le contrôle de paramètres expérimentaux, tels que la concentration en ions, la densité de courant, le temps, la température et la puissance des ultra-sons, permet l'obtention, en surface du tissu carboné, d'un revêtement uniforme et homogène d'hydroxyapatite déficiente en calcium (CDA). Elle possède une morphologie plaquettaire dont les particules sont biomimétiques car constituées d'une couche hydratée en surface et d'un cœur de structure ordonnée caractéristique de la structure de la phase minérale de l'os.



Défaut osseux recouvert d'un tissu de fibres de carbone à son extrémité supérieure observé par microscopie optique sur une coupe d'histologie.



Fibre de carbone recouverte d'un dépôt d'hydroxyapatite déficiente en calcium observée par microscopie électronique à balayage.

VERS DE NOUVELLES PROPRIÉTÉS THÉRAPEUTIQUES

Les apatites sont aussi connues pour être facilement modifiables notamment par insertion dans leur structure d'un ou plusieurs ions d'intérêt thérapeutique. C'est ainsi que de nombreux cations (l'argent, le lithium, le magnésium, le strontium...) peuvent se substituer au calcium dans la structure apatitique. L'ICMN a tout particulièrement étudié le strontium reconnu notamment pour ses facultés à stimuler la formation osseuse et inhiber la résorption osseuse dans le traitement de l'ostéoporose post-ménopausique. Le laboratoire a montré que la substitution des ions calcium par des ions strontium engendre de faibles modifications structurales sans changement de l'organisation et de la microtexture des nanocristaux et entraîne une augmentation de l'activité biologique du biomatériau.

"... permettre l'apport de molécules médicamenteuses directement au niveau du site opératoire."

Un autre atout majeur de ces matériaux carbonés est de permettre l'apport de molécules médicamenteuses directement au niveau du site opératoire. L'ICMN a donc analysé l'adsorption ciblée de principes actifs au sein de chaque constituant du biomatériau. C'est ainsi qu'il a révélé que, selon la nature de la molécule active (anti-inflammatoire, antalgique...), une adsorption sélective ainsi que des cinétiques de relargage différentes sont obtenues au sein de chaque constituant du biomatériau. Ceci permet l'obtention d'un biomatériau à double possibilité d'adsorption et de relargage de principes actifs différents, *in situ*, de manière contrôlée et sélective.

DES ESSAIS PRÉ-CLINIQUES PROMETTEURS

Les biomatériaux composites ont été analysés d'un point de vue biologique dans le cadre d'une collaboration avec l'Institut de Biologie Valrose (IBV) à Nice. C'est ainsi que des tests *in vitro* de viabilité cellulaire ont été réalisés en utilisant des ostéoblastes humains primaires, cellules responsables de la formation osseuse. Ensuite, des tests *in vivo* pour l'étude de la régénération osseuse en présence des différents biomatériaux ont été réalisés à l'aide d'un modèle de large défaut osseux chez le rat. Les biomatériaux ont été déposés à la surface de

défauts osseux de 2.7 mm de diamètre dans la partie distale de chaque fémur. Après différents temps post-opératoires, les os sont analysés par micro-scanner, IRM et histologie.

Que ce soit l'étude concernant l'incorporation du strontium dans la phase apatitique ou celle visant à l'adsorption de molécules actives, les tests *in vitro* ont mis en évidence une augmentation de la prolifération cellulaire en surface des biomatériaux.

Quant aux tests *in vivo*, les résultats montrent une excellente biocompatibilité des biomatériaux composites avec une colonisation rapide du tissu de fibres de carbone par un tissu biologique vascularisé permettant entre autre le maintien du biomatériau au niveau du site à réparer. Le biomatériau ainsi retenu permet l'accélération de la régénération osseuse avec un tissu de fibres de carbone servant de support à la croissance osseuse.

Ces expérimentations ont également montré que la présence du strontium améliore qualitativement la formation osseuse avec, à titre d'exemple, une épaisseur et une répartition de l'os néoformé plus homogènes. Concernant l'adsorption sélective de molécules actives au sein du biomatériau, ces tests *in vivo* ont mis en évidence un effet significatif des principes actifs sur la cinétique de régénération osseuse démontrant l'efficacité de ces biomatériaux composites comme système de relargage *in situ* de médicament.

Florian OLIVIER < ICMN
florian.olivier@cnrs-orleans.fr

Nathalie ROCHET < IBV
nathalie.rochet@univ-cotedazur.fr

Sylvie BONNAMY < ICMN
sylvie.bonnamy@cnrs-orleans.fr

<http://www.icmn.cnrs-orleans.fr/>

* L'ICMN collabore, pour ces travaux sur les biomatériaux carbonés avec : le CEMHTI, le GREMI, MACLE à Orléans et le GREMAN à Tours en Centre-Val de Loire,

** l'IBV à Nice et le CIRIMAT à Toulouse.

Plastiques ostréicoles, impacts environnementaux sur les Pertuis charentais

Les modes de production ostréicoles ont été facilités et se sont développés avec l'arrivée du plastique. Aujourd'hui, les conséquences de l'usage intensif de ce matériau dans des espaces naturels méritent une attention particulière des scientifiques.



Vue aérienne des parcs ostréicoles, La Flotte en Ré.

Couppelles de captage en polypropylène.

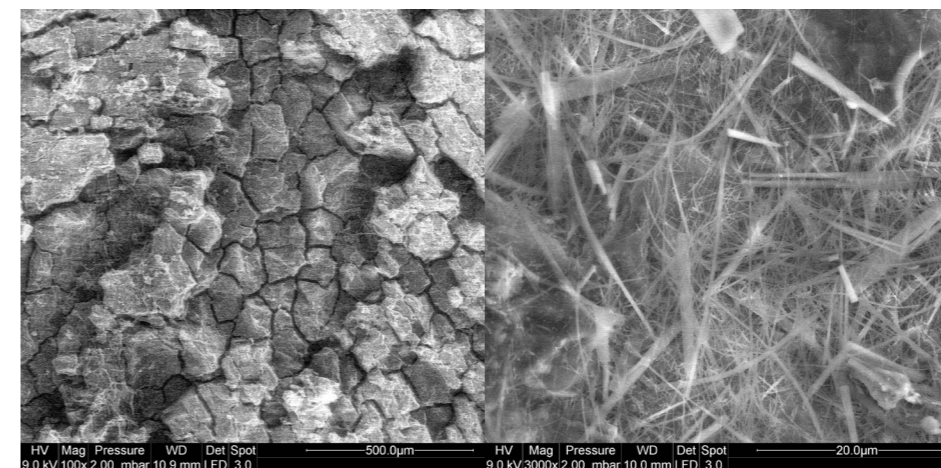
Avec près de 45 000 tonnes d'huîtres creuses produites chaque année, le secteur ostréicole du département de la Charente-Maritime, représente le premier bassin de production Français avec le tiers de la production nationale.

Depuis l'arrivée du plastique issu de la pétrochimie dans les années 1950, les professionnels de la filière se sont peu à peu orientés vers ce nouveau matériau, plus résistant, durable et économique. Différents types de plastiques (polypropylène, polyéthylène, polychlorure de vinyle...) sont désormais utilisés à chaque étape de l'élevage des huîtres : du captage des naissains, à la croissance et l'affinage. L'image environnementale de la profession est aujourd'hui critiquée, avec l'omniprésence de déchets plastiques d'origine ostréicole sur les espaces littoraux, conséquence des pertes et décrochages dans les zones de production. La diminution des impacts anthropiques sur l'environnement marin est un enjeu majeur pour l'ensemble des professionnels de la mer.

Le naissain issu de captage naturel est la première phase du cycle de production en ostréiculture traditionnelle. La Charente Maritime et

le bassin d'Arcachon sont les principales zones de captage d'huîtres creuses en France où la reproduction se fait ainsi de manière naturelle. Des couppelles de captage sont placées dans les parcs ostréicoles entre Juillet et Mars où les conditions environnementales sont optimales pour la reproduction. Ces couppelles, en polypropylène ou polyéthylène sont utilisées durant une vingtaine d'années. Bien que résistantes, elles subissent au cours de leur utilisation de nombreuses dégradations par les UV, l'eau de mer, les marées mais aussi lors des manipulations et du stockage. Elles se fragilisent, se fissurent, se cassent, et finissent par se fragmenter et se disséminer dans l'environnement sous forme de microplastiques en relarguant ou captant de nombreux polluants organiques. Ces polluants peuvent avoir des conséquences sur les écosystèmes marins et sur la santé humaine mais les impacts sont encore peu connus.

Au-delà des pertes et décrochages de plastiques ostréicoles sur des zones de production, les friches ostréicoles sont une autre source de pollution plastique à étudier. En effet, après cessation d'activité, certains ostréiculteurs abandonnent leur concession et le matériel, y compris



Vues par microscopie électronique à balayage. À gauche : couppelles en polypropylène après 3 cycles de captage (Gx100). À droite : couppelle neuve biosourcée (Gx3000).

les plastiques. Ces plastiques devenus non-recyclables car trop dégradés, se fragmentent ou s'enfouissent dans les sédiments des parcs. En se basant sur la comparaison de cadastres d'occupation des concessions ostréicoles il est possible de dater les déchets retrouvés et de les étudier afin de mieux comprendre leurs évolutions temporelles et géographiques sur du long terme.

"... une meilleure compréhension du comportement des plastiques utilisés aujourd'hui..."

LE PROJET PLASTIC LAB

Avec pour objectif l'amélioration des techniques de production en ostréiculture et la réduction de la pollution plastique résultante, la recherche scientifique mise sur une meilleure compréhension du comportement des plastiques utilisés aujourd'hui afin de mettre en place les outils de demain. Le projet Plastic Lab porté par le LIENSs (Laboratoire Littoral Environnement et Société UMR17266 – CNRS/La Rochelle Université) est financé par le Fonds Européen des Affaires Maritimes et de la Pêche (FEAMP). Il a pour objectif l'étude des mécanismes de dégradation des plastiques ostréicoles en milieu marin. Le but final est également la création d'un "Guide des bonnes pratiques" communiqué aux professionnels de la filière en collaboration avec des acteurs locaux comme le Comité Régional de la Conchyliculture de la Charente-Maritime (CRC17), l'Agence Française pour la Biodiversité, le Parc naturel marin de l'estuaire de la Gironde et de la mer des Pertuis, la société TEO (co-financeur du projet) et en partenariat avec le laboratoire QUALYSE de La Rochelle.

Dans le premier volet de ce projet, le focus sera fait sur les couppelles de captage. Une démarche de caractérisations chimiques et structurales complétée par une phase expérimentale de vieillissements accélérés en laboratoire en conditions contrôlées apporte déjà de premiers résultats novateurs sur la question. La comparaison de couppelles vieillies *in situ* dans les Pertuis Charentais et de couppelles vieillies en laboratoire, a permis de concevoir une gamme de vieillissement et de toxicité. Ces couppelles ont été caractérisées par différentes techniques expérimentales comme la microscopie électronique à balayage, la calorimétrie différentielle, et la spectroscopie infrarouge. Ces caractérisations

ont été menées au LIENSs et au Laboratoire Sciences pour l'Ingénieur de l'Environnement (LaSIE UMR 7356 – CNRS/La Rochelle Université).

Les premiers résultats montrent et confirment que le stockage au soleil et les stress mécaniques comme les marées, le vent, la pluie, mais aussi les manipulations avaient un vrai impact sur l'accélération du vieillissement des plastiques en milieu marin et donc sur la fragilisation et la fragmentation. Ces premières conclusions permettent d'orienter les solutions sur une meilleure gestion de l'utilisation et du stockage des couppelles sur les concessions ostréicoles. Elles soulignent également l'importance de la gestion des friches ostréicoles dans les Pertuis Charentais.

DES SOLUTIONS EXISTENT

En 2017, un projet territorial mené par CAPENA (Centre pour l'Aquaculture, la Pêche et l'Environnement de Nouvelle-Aquitaine) a porté sur une étude comparative des capacités de captage de couppelles biosourcées avec des couppelles en polypropylène sur trois cycles de captage. Ces couppelles neuves et vieillies ont également été caractérisées et vieillies en laboratoire. Bien que moins durables dans le temps, elles se sont avérées mieux captantes (et peut être moins toxiques). Aujourd'hui, ces solutions sont encore coûteuses et méritent plus d'investigations... Les démarches actuelles visent à élaborer des "scénarios pour l'avenir" décrivant, à partir de connaissances scientifiques débattues avec les acteurs locaux, les évolutions possibles puis souhaitables, de l'utilisation de plastiques ostréicoles à l'échelle territoriale, nationale et internationale.

Marion HINGANT < LIENSs
marion.hingant@univ-lr.fr

Hélène THOMAS < LIENSs
helene.thomas@univ-lr.fr

Arno BRINGER < QUALYSE
arno.bringer@qualyse.fr

<https://lienss.univ-larochelle.fr>

<https://www.qualyse.fr/>

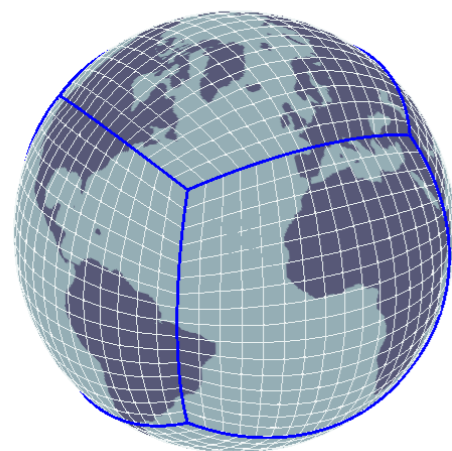
Prédire le climat : un travail de précision et de rapidité

Une collaboration entre le laboratoire de Mathématiques et Applications de Poitiers et l'institut Élie Cartan de Lorraine étudie et développe des méthodes précises et rapides pour résoudre les équations du climat.



Dans un contexte de réchauffement climatique, il est important de disposer d'outils pour simuler avec précision la dynamique atmosphérique. Il existe des modèles mathématiques décrivant ces phénomènes basés sur des équations aux dérivées partielles. Ces derniers n'ont pas de solution analytique connue. Partant de cette problématique, dès 1922 L. F. Richardson, mathématicien, météorologiste et psychologue britannique, publie *Weather prediction by numerical process*. Il y détaille un processus de calcul approché pour prédire l'évolution de l'atmosphère de la Terre et conclut: "64 000 computers would be needed to race the weather for the whole globe". L'auteur met en avant l'une des

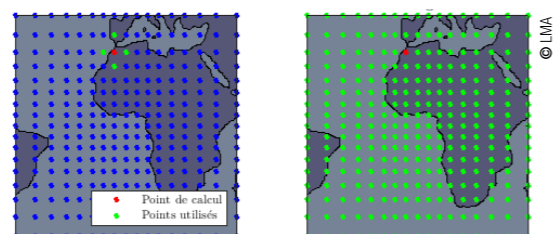
Illustration d'une sphère cubée.



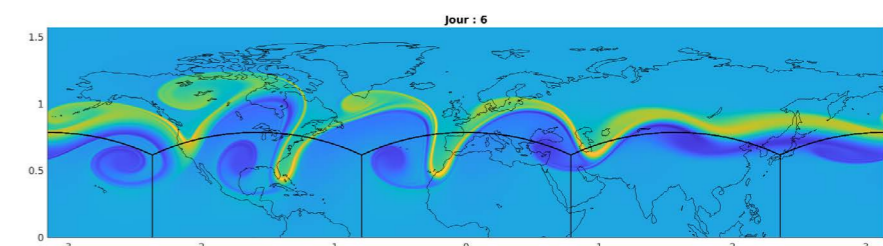
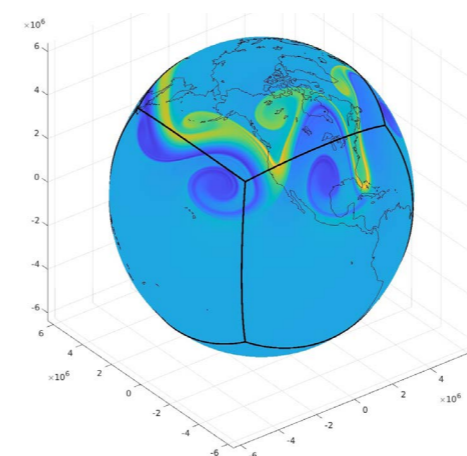
principales difficultés pour effectuer le calcul. Ne disposant pas d'ordinateur à l'époque, le terme "computer" désigne la personne chargée de faire les calculs : il a besoin de 64000 employés pour effectuer suffisamment vite un calcul qui reste une approximation. On peut résumer le problème ainsi : connaissant l'état actuel de l'atmosphère et à l'aide d'un modèle décrivant son évolution, comment calculer les états futurs de l'atmosphère en un minimum de temps et avec un maximum de précision ? Si l'informatique a contribué à de grandes avancées sur la rapidité du calcul, la méthode d'approximation reste centrale.

FAIRE LE MOINS POSSIBLE DE CALCULS

Simuler la dynamique de chaque molécule de l'atmosphère demanderait un nombre d'opérations prohibitif. L'idée est plutôt de superposer une grille et de ne faire les calculs qu'aux nœuds de cette dernière. On parle de méthode de différences finies. Le choix de la grille est crucial, lorsque les points sont alignés, l'ordinateur pourra faire plus vite les opérations.



Méthode locale (à gauche), globale (à droite). Pour calculer ce qu'il se passe au point rouge, on utilise les points verts. Dans une méthode globale, tous les points de la grille sont utiles contrairement à une méthode locale.



Cas test des ondes barotropiques - Il s'agit d'un mouvement ondulatoire de la circulation atmosphérique qui s'étale sur de grandes distances.

Le choix des mathématiciens du LMA (Laboratoire de Mathématiques Appliquées – UMR7348 CNRS/Université de Poitiers) s'est porté sur la Sphère-Cubée. Il s'agit d'une grille cubique que l'on déforme pour recouvrir la Terre. La construction à partir des faces d'un cube rend la grille facile à manipuler.

Les équations donnent une relation entre les différents nœuds. L'approximation du modèle repose sur la manière dont le lien est établi. Par exemple pour calculer la pression en un point de la grille, un choix naturel est de ne faire intervenir que les points voisins puisque ceux éloignés ont moins d'influence. On parle d'une méthode locale. Ce choix permet à l'ordinateur de faire les calculs rapidement mais la précision est généralement faible. Pour être plus précis, on peut augmenter la finesse de la grille ce qui augmente le temps de calcul.

Une autre possibilité est de considérer une méthode globale où tous les points de la grille interviennent. Le coût en calcul est plus important mais la précision est plus grande. Le calcul est précis sans qu'il y ait un trop grand nombre de nœuds disposés sur la planète.

UN GRAND PAS DANS LE FUTUR

Une fois les liens entre les nœuds établis, il reste à voir comment avancer dans le temps. La pression au temps t^n , supposée connue sur l'ensemble des points, permet de prédire la pression au temps t^{n+1} . L'évolution entre les deux est donnée par le modèle atmosphérique et l'approximation qui a été faite en espace. Si l'état initial est connu, l'état de l'atmosphère à chaque instant devient accessible en avançant pas par pas.

"...tester la méthode pour évaluer sa pertinence."

En considérant les approximations en temps et en espaces, la manière dont les erreurs se propagent est appelée la stabilité. Elle repose en partie sur la manière d'avancer dans le temps. Afin de limiter le temps de calcul, il est souhaitable d'avoir à avancer le moins souvent possible et donc de faire de grands pas dans le futur. En 1928 déjà, R. Courant, K. Friedrichs et H. Lewy, mathématiciens allemands, démontrent que pour les méthodes les moins coûteuses en calculs, il est impossible de faire de grands pas dans le temps, en particulier pour les phénomènes

qui évoluent rapidement. Il s'agit de la condition CFL. Des méthodes impliquant plus de calculs permettent de faire de grands pas. Il y a un compromis à trouver entre de grands pas coûteux et un grand nombre de petits pas faciles à effectuer. C'est un sujet d'actualité au sein de la communauté de climatologie numérique.

VALIDATION DE LA MÉTHODE

Le lien entre les points de la grille et la manière de se déplacer dans le temps constituent un schéma numérique. Il s'agit d'un ensemble d'instructions permettant de faire les calculs. Il faut à présent tester la méthode pour évaluer sa pertinence.

D'un point de vue théorique, on calcule l'ordre de la méthode. Le schéma numérique étudié à Poitiers est d'ordre 4. Cela signifie que si l'on double le nombre de points sur la grille, le résultat est $2^4=16$ fois plus précis.

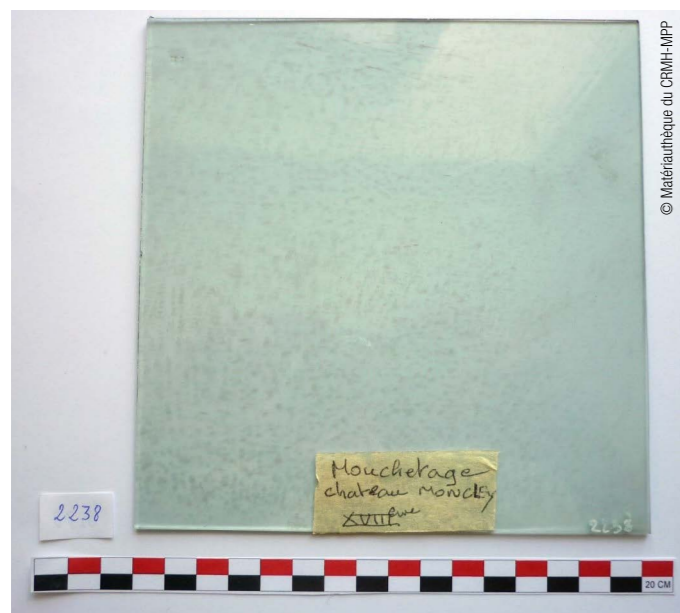
Du point de vue de la simulation, le schéma numérique est programmé pour un modèle simplifié. Même si ce dernier ne représente pas une atmosphère réaliste, il valide (ou non) la méthode avant de s'approcher d'un modèle complexe. On exécute un ensemble de cas tests, des simulations où le résultat attendu est connu et on compare l'approximation avec le résultat espéré. Le schéma numérique a donné des résultats tout à fait satisfaisants et en un temps raisonnable sur un ordinateur de bureau.

La méthode numérique étudiée au laboratoire de mathématiques et applications de Poitiers est le fruit de collaboration et de comparaison avec d'autres grilles et d'autres méthodes telles que les éléments finis et les volumes finis. Ces recherches permettent de mieux comprendre et anticiper les qualités et défauts des schémas numériques présents dans les grands algorithmes de simulation utilisés pour l'étude du climat. L'objectif est à présent d'augmenter le réalisme des modèles considérés et de perfectionner l'outil d'approximation.

Matthieu BRACHET < LMA
matthieu.brachet@math.univ-poitiers.fr
<http://rech-math.sp2mi.univ-poitiers.fr>

Lumière sur des plaques de verre du XVIII^e siècle

En 1729, Pierre Bouguer présente la première mesure du facteur de transmission d'une plaque de verre. Et si nous refaisions cette mesure aujourd'hui... avec du verre du XVIII^e siècle, les résultats seraient-ils les mêmes ?



Cette plaque de verre présente le facteur de transmission le plus proche de celui mesuré par Bouguer. L'échantillon, daté de la seconde moitié du XVIII^e siècle, provient du château de Moncley dans le Doubs inv. B/80/72/2238.

Dans son *Essai d'optique* publié en 1729, Pierre Bouguer, mathématicien, physicien, géodésiste et hydrographe français, propose une méthode pour mesurer l'intensité lumineuse d'une source de lumière avec le seul photodétecteur à disposition : l'œil humain. Afin que la mesure soit indépendante de l'opérateur, le principe consiste à égaliser les luminosités perçues entre deux zones adjacentes, illuminées simultanément par la source de lumière à mesurer et par une source de référence, par exemple une bougie. Il faut ensuite créer une échelle en intensité lumineuse. Bouguer utilise pour cela la loi dite des carrés inverses : l'éclairement en un point varie en inverse de la distance au carré de la source lumineuse à ce point. La mesure d'une intensité lumineuse revient à une simple mesure de distances.

DES PLAQUES DE VERRE PAS SI CLAIRES

Bouguer adapte ce protocole pour réaliser les premières mesures de facteur de transmission d'un milieu transparent, c'est-à-dire pour déterminer le pourcentage de flux lumineux transmis par ce milieu. Le premier système mesuré est un empilement de 16 plaques de "verre ordinaire dont on fait les vitres". L'épaisseur totale est de 9 lignes et demie, soit environ 21,5 mm. L'intensité lumineuse est alors diminuée, selon les mesures de Bouguer, d'un facteur 240. Par d'autres mesures et par déduction, il va estimer que le facteur de transmission d'une seule plaque est dans un rapport de 5 à 7, soit 71%.

Cette valeur intrigue car elle est beaucoup plus faible que celle d'une vitre actuelle de l'ordre de 92%. Le verre utilisé par Bouguer était probablement soufflé. Plus absorbant, il devait contenir une proportion d'oxyde de fer plus grande qu'aujourd'hui, à l'origine d'une coloration

verte. Mais est-ce suffisant pour expliquer une si faible transmission ? Ne peut-il pas s'agir d'une erreur de mesure de Bouguer ? Deux chercheurs de l'institut Pprime à Poitiers (UPR3346 CNRS) et du laboratoire Hubert Curien de Saint-Etienne sont partis en quête de plaques de verre du XVIII^e siècle pour tenter de répondre à ces questions.

UNE MATÉRIAUTHÈQUE DU PATRIMOINE

Née dans les années 1930, la matériauthèque du Centre de recherches sur les Monuments historiques (Ministère de la Culture/Médiathèque du patrimoine et de la photographie) réunit une collection d'échantillons issus notamment des chantiers de restauration de bâtiments patrimoniaux. Il s'agit d'un témoignage des matériaux et des savoir-faire anciens à destination des professionnels en charge de la restauration des monuments, et du grand public. Toujours enrichie, elle est consultable depuis 2022*. La liste des matériaux est longue : bois, métal, mortier, pierre, plâtre, terre cuite ou verre. La collection contient également des outils. Des plaques de verre du XVIII^e siècle ont été sélectionnées notamment en fonction de leur transportabilité. Six d'entre elles ont été retenues pour être caractérisées optiquement à l'Institut d'Optique à Saint-Etienne.

"... les mesures présentent de fortes variabilités selon le mode opératoire."

COMMENT MESURER UN FACTEUR DE TRANSMISSION AUJOURD'HUI ?

L'objectif de l'étude n'était pas de reproduire la méthode d'égalisation visuelle de Bouguer mais d'utiliser les techniques expérimentales d'aujourd'hui pour estimer les facteurs de transmission des différentes plaques de verre. Bien que le procédé semble très simple – il s'agit de placer un photodétecteur en face d'un faisceau lumineux et de faire le ratio entre le signal détecté en présence puis en l'absence de la plaque – les mesures présentent de fortes variabilités selon le mode opératoire. Les chercheurs ont testé avec un laser, lumière monochromatique présentant un faisceau fin et directionnel, très sensible aux moindres inhomogénéités présentes sur certaines plaques (mouchetages, microbulles). Dans une autre configuration, ils ont utilisé une table lumineuse à LED blanches permettant de réaliser la mesure d'un faisceau plus large à travers une aire plus grande et de limiter ainsi l'effet des hétérogénéités. Différents capteurs ont également été employés. Les facteurs spectraux de transmission mesurés au spectrophotomètre confirment la teinte verte observée sur certains échantillons du XVIII^e siècle.

Un luminancemètre, muni d'un filtre photopique reproduisant la sensibilité spectrale de la vision humaine diurne, a aussi été utilisé. Enfin, l'emploi d'une sphère intégrante permet d'éviter que la lumière diffusée par les imperfections des échantillons n'échappe à la détection. Avec ce dispositif, une surestimation de +2 à +10% est observée selon les échantillons.

Les plaques sélectionnées ne sont certainement pas celles utilisées par Bouguer, lesquelles nous restent inconnues. Néanmoins, les mesures réalisées sur ces échantillons d'époque montrent une grande disper-



Portrait de Pierre Bouguer, 1698-1758 par Jean-Baptiste Perroneau - Musée du Louvre

sion du facteur de transmission de 56 à 84%, et la valeur mesurée par Bouguer est bien dans cet intervalle. Une plaque de verre provenant du château de Moncley dans le Doubs présente un facteur de transmission de 73%, proche de la valeur de Bouguer et donc bien inférieure à celui des vitres actuelles.

LA PREMIÈRE LOI DE PHOTOMÉTRIE

Dans la démarche scientifique de Bouguer, l'expérience prévaut. À partir des mesures de facteurs de transmission pour des empilements de plaques de verre, il va établir l'une des toutes premières lois de la photométrie, injustement appelée loi de Beer-Lambert des noms des savants Lambert et Beer dont les contributions à cette loi, respectivement en 1760 et 1852, sont secondaires et postérieures à celle de Bouguer. Cette loi peut s'énoncer ainsi : le facteur de transmission pour un empilement de N plaques de verre identiques est égal à celui d'une seule plaque, porté à la puissance N. Il s'agit d'une approximation puisque Bouguer ne tient pas compte des réflexions multiples de lumière entre les plaques. Avec un facteur de transmission de 71% pour une plaque, l'approximation de Bouguer est excellente mais s'il avait eu accès à des vitres parfaitement claires, il aurait saisi que son modèle sous-estime fortement le facteur de transmission.

En 1760, Lambert prend correctement en compte les réflexions entre plaques de verre supposées non absorbantes. Mais il applique son modèle pour du verre encore loin d'être parfaitement clair... Le calcul du facteur de transmission d'un empilement de plaques de verre potentiellement absorbantes ne sera proposé qu'en 1860 par Stockes, alors que les techniques de fabrication permettent d'obtenir des vitres de plus en plus incolores.



Initialement publié en 1729, l'Essai d'optique de Pierre Bouguer a été ré-édité en 2021. Bouguer y présente les premières mesures d'un facteur de transmission d'un empilement de plaques de verre.

Ainsi, les moyens expérimentaux actuels confirment que les plaques de verre utilisées par Bouguer étaient sensiblement absorbantes. La validité de la première mesure d'un facteur de transmission n'est donc pas à remettre en cause. C'est même la relativement faible valeur obtenue qui a permis, presque par chance, à Bouguer d'établir la loi de décroissance du facteur de transmission en fonction de l'épaisseur traversée.

Lionel SIMONOT < PPRIME
lionel.simonot@univ-poitiers.fr

Mathieu HEBERT < LABORATOIRE HUBERT CURIEN
mathieu.hebert@univ-st-etienne.fr

Véronique KIENTZY < MATÉRIAUTHÈQUE DU CRMH
veronique.kientzy@culture.gouv.fr

www.pprime.fr

https://laboratoirehubertcurien.univ-st-etienne.fr

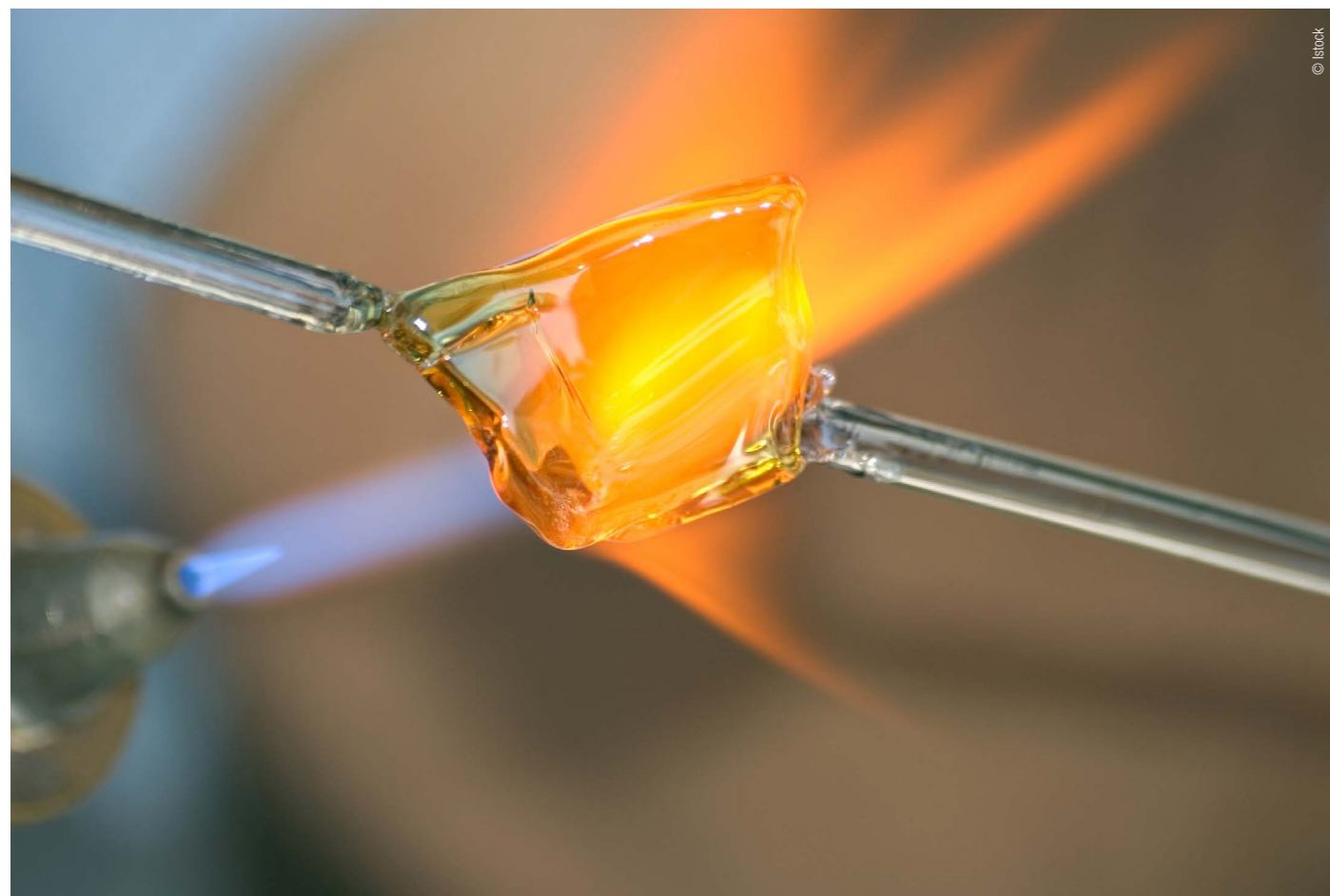
www.institutoptique.fr

https://mediatheque-patrimoine.culture.gouv.fr/
la-materiautheque-du-crmh

* www.pop.culture.gouv.fr.

Année internationale du verre... des verres pour quelles recherches ?

Le verre, cet état de la matière si particulier et présent partout autour de nous : de la vaisselle aux fenêtres, en passant par la fibre optique qui nous relie au monde. Ce matériau façonné par les humains depuis des millénaires, que ce soit à but utilitaire ou artistique, tellement imbriqué dans notre culture que nous n'hésitons pas à « prendre un verre »... le caractère inerte du verre nous garantissant alors la plus grande sécurité...



Formage d'un verre par chauffage au chalumeau.

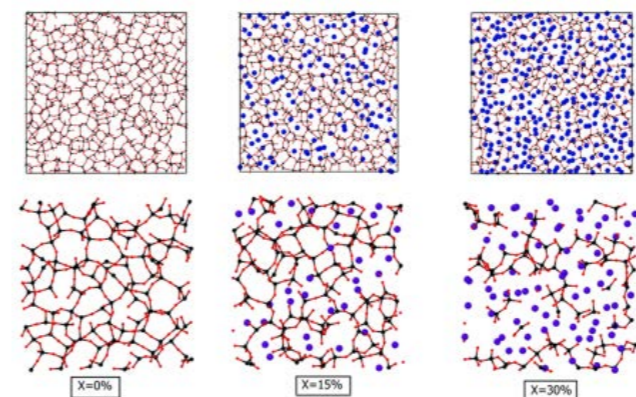
LA CHIMIE DES VERRES

La recette du verre d'oxyde silicaté classique a traversé les âges et n'a globalement été que peu modifiée. Elle consiste à porter à très haute température (au-delà de 1000°C) un mélange d'oxydes composé d'un vitrifiant, généralement du sable (silice), d'un fondant afin d'abaisser la température d'élaboration et d'un stabilisant essentiel aux propriétés du verre. Ce mélange fondu est ensuite refroidi suffisamment rapidement pour éviter les phénomènes de cristallisation et ainsi "figer" le liquide de haute température. La matière passe alors d'un état de liquide dit "surfondu" à l'état de verre solidifié à une température caractéristique appelée : température de transition vitreuse. À l'échelle atomique, des motifs structuraux plus ou moins étendus, constitués de tétraèdres SiO₄, forment alors le squelette du verre avec un désordre structural qui les différencie des matériaux cristallins.

SIX MOYENS DE CARACTÉRISER LES VERRES

Dans l'étude des verres, l'investigation s'appuie souvent sur un ensemble de techniques spectroscopiques et d'analyses physico-chimiques et microscopiques, complétées par des techniques de simulation numérique.

La spectroscopie de diffusion Raman est une méthode non-destructive, qui permet de déterminer la composition, la structure ou encore la dynamique d'un verre, d'évaluer son degré de polymérisation, sa densité et ses températures caractéristiques. La cartographie Raman, un spectre étant acquis en chaque point du matériau, contribue alors à sonder l'homogénéité des verres à l'échelle microscopique. C'est indispensable pour comprendre les propriétés et l'évolution du verre en fonction de différentes contraintes. Cet outil, couplé à un système de lévitation aérodynamique, a permis d'obtenir le record mondial de température en Raman à 2600°C.

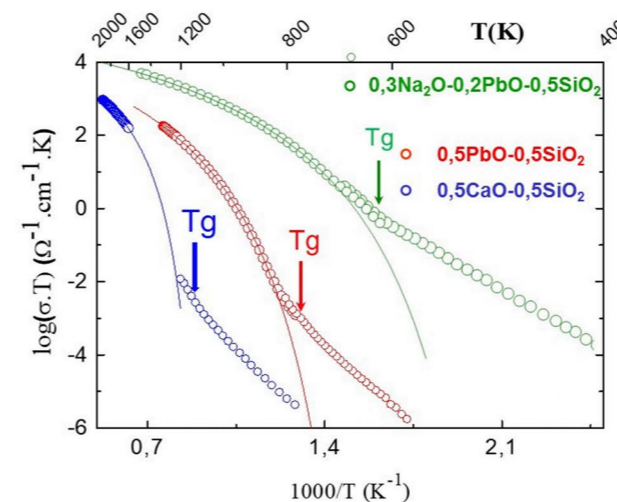


Simulation de la structure du verre $(\text{SiO}_2)_{1-x}-(\text{K}_2\text{O})_x$ grâce à la dynamique moléculaire appliquée aux données issues de la diffusion Brillouin.

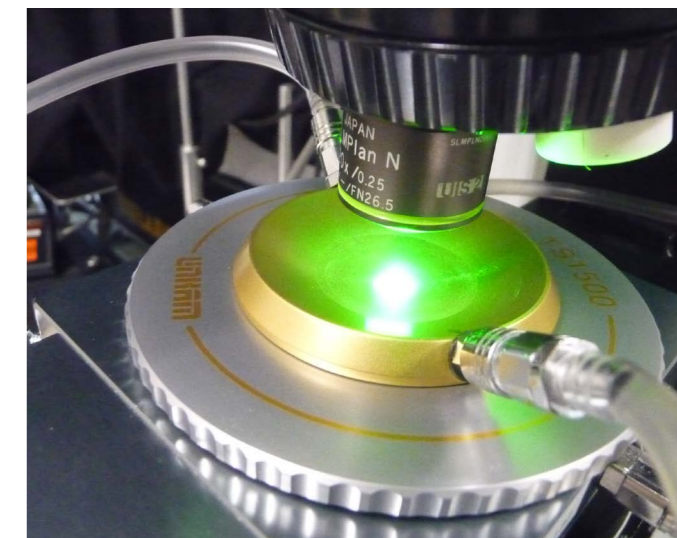
De façon complémentaire, la diffusion Brillouin de la lumière permet de sonder les propriétés mécaniques des verres. Les changements d'état lors de la transition vitreuse, du liquide surfondu au solide, peuvent alors être analysés à partir des études à haute température, de même que l'évolution mécanique ou les altérations d'un verre lors des processus de relaxation.

" ... enrichir les connaissances sur la nature des arrangements chimiques dans le verre... "

La spectroscopie Infrarouge complétée par la mesure de l'émissivité spectrale (jusqu'à très haute température ~2000 K), c'est-à-dire de la lumière émise par un matériau chauffé, ouvre quant à elle l'accès aux propriétés thermo-radiatives et optiques en plus des propriétés structurales du verre. Des outils de modélisation sont développés afin de caractériser l'impact d'éventuelles hétérogénéités (porosités, démixtion) sur le signal optique dans le but d'optimiser des propriétés spécifiques (esthétique, propriétés de réflexion, transmission).



Conductivité électrique de 3 verres d'oxydes de l'état fondu jusqu'à l'état solide.



Spectroscopie Raman en température.

Depuis plusieurs décennies, la RMN ou Résonance Magnétique Nucléaire s'est imposée dans la caractérisation structurale des verres en tant que matériaux désordonnés. La structure du verre s'apparente en effet plus à celle d'un liquide figé, sans ordre à longue distance qu'à celle d'un cristal. Ainsi en observant les noyaux silicium (isotope 29), la RMN a permis de décrire le réseau du verre et son degré de polymérisation : la manière dont les tétraèdres SiO₄ sont connectés les uns avec les autres. Cette description s'est affinée au cours des années grâce à l'enrichissement isotopique en faveur d'un noyau observable mais peu abondant naturellement (silicium 29, oxygène 17). Le développement de nouvelles séquences RMN permettant de définir des entités moléculaires toujours plus complexes a également été primordial. Ainsi, on a pu caractériser les relations entre deux noyaux (de nature identique ou différente), leur liaison chimique, leur distance, tels que le silicium et l'aluminium ou encore le silicium et le bore ou l'hydrogène. Ces techniques d'acquisition sophistiquées ont apporté un gain en résolution remarquable et permis d'enrichir les connaissances sur la nature des arrangements chimiques dans le verre.

La Microscopie Electronique en Transmission MET est un autre outil de choix pour la caractérisation microstructurale de l'échelle du micron à l'atome. Dans le domaine verrier, paradoxalement, cette technique permet de détecter des inhomogénéités, telles que la présence de phases cristallines nanométriques, en couplant l'imagerie et la diffraction électronique. Parmi les outils disponibles, l'imagerie à contraste chimique ainsi que les analyses chimiques sont d'intérêt pour mettre en évidence différentes phases vitreuses dans un verre non homogène qui peut alors présenter une séparation de phase ou bien des enrichissements chimiques locaux.

Réputé comme isolant électrique, le verre présente cependant des propriétés de conduction qu'il est important de pouvoir caractériser pour certaines applications et une meilleure compréhension du matériau. Cette conduction peut être d'origine ionique, électronique ou mixte. D'un point de vue expérimental, la spectroscopie d'impédance complexe, réponse du matériau à une tension alternative, est la technique de choix pour analyser la conductivité en fonction de la fréquence du signal et séparer les différents mécanismes. Dans la technique du

creuset froid par chauffage inductif, développée au CEA Marcoule pour l'élaboration du verre nucléaire, les mesures de conductivité ont permis d'étudier les mécanismes de conduction du bain fondu. Ainsi, au-delà d'un seuil très faible (~ 1%) de particules d'oxyde de ruthénium, la conductivité augmente de plusieurs ordres de grandeur, préjudiciable au procédé de chauffage.

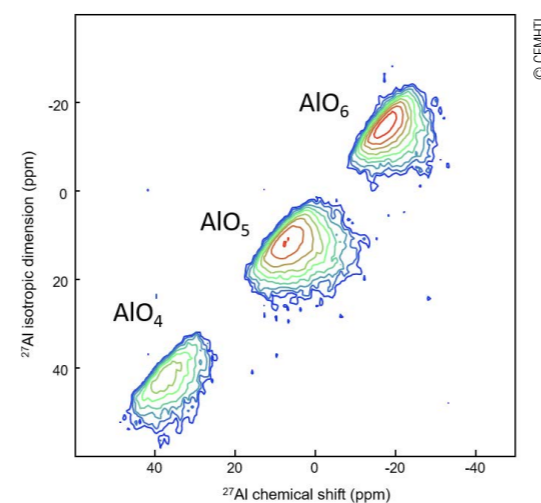
LE VERRE INERTE ET BIOACTIF...

Le verre compte parmi les matériaux les plus inertes chimiquement. C'est à dire qu'il n'interagit pas (ou extrêmement faiblement) avec son contenu. Dans le domaine pharmaceutique, le développement de nouveaux médicaments peut se heurter aux limites du conditionnement durable. Des travaux innovants ont été développés sur le renforcement de flacons pharmaceutiques par des films minces de silice déposés par voie chimique en phase vapeur et caractérisés par analyses par faisceaux d'ions IBA de l'accélérateur Pelletron et par microscopie. Des résultats exceptionnels ont ainsi été obtenus pour des couches oxytriturées qui ont prouvé leur extrême durabilité chimique grâce à la densification du réseau chimique par substitution de l'oxygène par l'azote.

Dans le domaine de la santé, les bioverres sont utilisés depuis les années 80 dans de nombreuses applications : chirurgie maxillo-faciale, revêtements d'implants osseux. Immérgés dans le milieu physiologique, leur bioactivité découle de leur capacité à former un dépôt d'hydroxyapatite carbonatée. Un accrochage chimique rapide de l'implant à l'os est alors possible. Le développement de nouveaux biomatériaux composites hybrides a été étudié par spectroscopie RMN, permettant la caractérisation fine de la structure vitreuse, et de l'interface entre les deux phases minérale/organique, indispensable pour prédire la dissolution des futurs implants dans l'organisme.

LE VERRE ET LES DÉCHETS DANGEREUX

La propriété de durabilité chimique est aussi au cœur des problématiques d'inertage de déchets dangereux tels que les déchets nucléaires. De nombreuses familles de verre ont été étudiées par RMN, en particulier les verres boro-aluminosilicates de terres rares, simulant les actinides mineurs et produits de fission. Outre la composition, le comportement à long terme (des milliers d'années...) est un élément clé du cahier des charges : tenue à l'irradiation, à l'eau. Ces propriétés ont fait



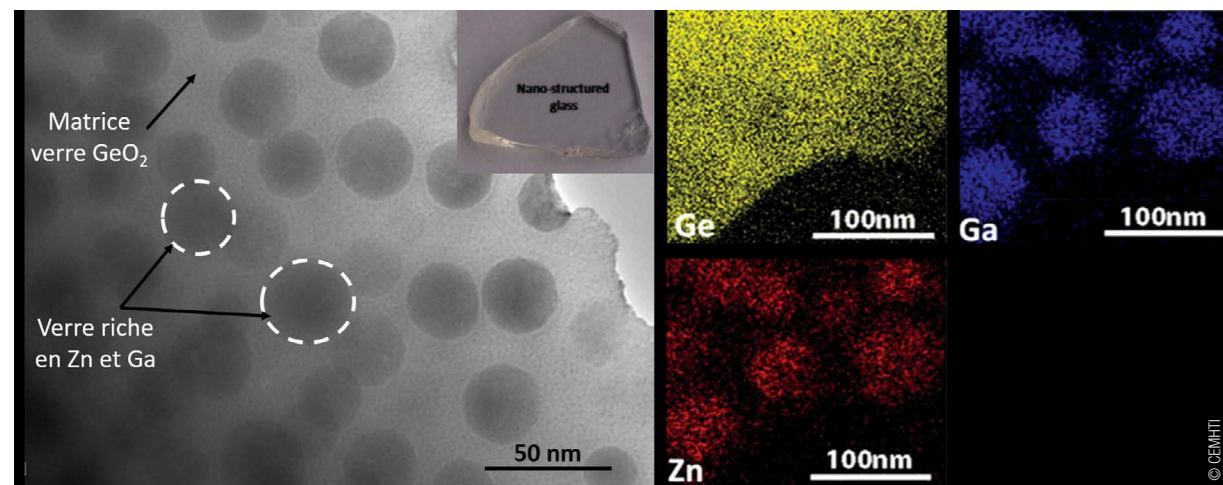
Spectre RMN du noyau aluminium-27 dans un verre de phosphate de calcium et d'aluminium

l'objet de tests spécifiques : les verres subissant une irradiation externe (particules alpha) et un vieillissement accéléré en présence d'eau. Ces travaux servent aujourd'hui de base pour la formulation de verres d'inertage de déchets spécifiques tels que ceux des réacteurs à neutrons rapides.

"... la recherche et l'innovation pour les matériaux de haute technicité de demain."

VERRES, VITROCÉRAMIQUES ET CÉRAMIQUES...

Les vitrocéramiques et céramiques transparentes couvrent un large domaine d'applications optiques (photonique, lasers). De nouveaux matériaux sont optimisés en se servant du verre comme point de départ : par cristallisation partielle de verres démixés, avec le contrôle de la séparation de phase obtenue dans le verre, suivie par un traitement thermique de cristallisation, ou bien par cristallisation complète et congruente, au-delà du champ connu des systèmes de symétrie cubique. Ici le procédé de synthèse par lévitation aérodynamique permet d'accéder à des systèmes inédits. Un aluminat de baryum a été à la base de la première céramique transparente élaborée par cette voie. Ces verres spécifiques ont aussi un intérêt dans le domaine de la chimie des batteries où les vitrocéramiques trouvent une application promet-



Vitrocéramiques transparentes. Image TEM et cartographies chimiques d'un verre à séparation de phase dans le système $GeO_2-ZnO-Ga_2O_3$



Étude Raman en musée des verres utilisés par le sculpteur verrier Henri Navarre (musée des beaux-arts de Chartres).

teuse comme composant des électrolytes solides inorganiques offrant une piste pour améliorer à la fois leur sécurité et durée de vie.

VERRES ET MUSÉES

Dans un tout autre champ, des travaux récents sont consacrés à la valorisation du patrimoine verrier régional : verre industriel et artisanat verrier, collections muséales. Ce travail envisage les techniques verrières se rapportant à la réalisation de pièces et vise à contextualiser d'un point de vue culturel et sociologique ces savoir-faire. Il a donné lieu à la production de répliques d'œuvres et de supports filmiques. Des études de durabilité chimique renseignent sur le vieillissement des pièces. La RMN apporte des informations précieuses sur le réseau altéré par l'action de l'eau, complétées par des profils chimiques de la surface altérée (analyses IBA). Des études en collaboration avec le Centre International du Vitrail abordent la coloration du verre, en particulier les mécanismes de précipitation de nano particules métalliques

Le CEMHTI et le verre

Fort de son expertise dans le domaine du verre, le laboratoire CEMHTI s'est naturellement associé au laboratoire LEMTA (Nancy) et au groupe industriel Saint-Gobain, à travers deux de ses centres de recherche (SGR Provence, SGR Paris) conduisant en octobre 2020 à la création du laboratoire commun CANO-PEE. Une meilleure compréhension des phénomènes et une capacité accrue à mesurer précisément des propriétés, dans des conditions extrêmes de températures, propres aux technologies verrières, doivent permettre des progrès significatifs dans le contrôle des procédés et dans les performances des matériaux (isolation, structure des fours verriers...) conduisant à la réduction des émissions de CO_2 et des ressources énergétiques dans les procédés industriels, enjeu ô combien d'actualité et essentiel à la pérennité de nos sociétés.

dans le cadre des colorations dites par « Jaune d'argent » ou « Rouges de cuivre » utilisées depuis le 13^{ème} siècle. Dans ce champ de l'esthétique du verre, des études récentes se penchent sur l'irisation ou encore les dépôts de nanoparticules métalliques pour offrir de nouvelles propriétés optiques. Une résidence d'artiste de l'université d'Orléans axée sur le verre accompagnera ces explorations et une exposition sur les fonds verriers du musée d'Orléans sera visible au printemps 2023.

Ces quelques exemples illustrent l'omniprésence du verre dans notre quotidien et sa place dans la recherche et l'innovation pour les matériaux de haute technicité de demain. Physiciens et chimistes s'attachent à toujours mieux comprendre les phénomènes et à mesurer avec toujours plus de précision et d'imagination les signaux disponibles dans des conditions parfois extrêmes. Aujourd'hui ces progrès et ces efforts sont tournés vers l'avenir de la filière Verre face aux problématiques environnementales. Des méthodes ancestrales aux détails nanométriques de la structure, l'année du verre nous éclaire sur la richesse de ce matériau dans les mains des artistes, artisans, industriels ou chercheurs. Manifestations et documentaires à suivre sur le site national <https://www.anneeduverre2022.fr>

Nadia PELLERIN < CEMHTI
nadia.pellerin@univ-orleans.fr

<https://www.cemhti.cnrs-orleans.fr>

Cet article est issu d'un travail collaboratif de l'ensemble des scientifiques du laboratoire qui étudient le verre.

Du sucre dans les détergents

La production de détergents est essentiellement issue de l'industrie pétrochimique et génère une pollution grandissante. Le développement de détergents à partir de ressources renouvelables est aujourd'hui un enjeu majeur.



Dans le réacteur sous pression muni d'un catalyseur, on introduit les sucres issus de la biomasse. Après réaction, le réacteur est ouvert pour analyser la nature des produits formés (tensioactifs).

Le savon est le premier détergent à avoir été massivement utilisé dans le monde. En effet, celui-ci fut employé pour de nombreux usages domestiques, tant pour le nettoyage du corps que pour le nettoyage ménager de par sa capacité à éliminer les graisses. Cependant, lors de la seconde guerre mondiale, la forte pénurie de graisse animale et végétale ainsi que l'essor de l'industrie pétrochimique ont conduit au développement de nouveaux détergents industriels bien plus efficaces pour le nettoyage que le savon. Depuis, une multitude de détergents aux propriétés tensioactives plus variées les unes que les autres a été développée et a relégué le savon à la toilette corporelle. Cette grande variété de détergents multi-usages est devenue, en un demi-siècle, indispensable à la vie quotidienne.

DES DÉTERGENTS ET L'ENVIRONNEMENT

Les détergents chimiques contiennent des "tensioactifs" qui leur permettent d'avoir des propriétés détachantes et désinfectantes. En effet, le tensioactif est un ingrédient indispensable à la fabrication des détergents. C'est une molécule chimique constituée de deux parties très distinctes : la première est dite "hydrophobe" et aura une forte affinité avec les matières organiques, les salissures, tandis que la deuxième

partie est appelée "hydrophile" et sera fortement attirée par l'eau. Dans les détergents, les tensioactifs (hydrophobe et hydrophile) permettent tout simplement de pouvoir mélanger des matières organiques (par exemple les graisses) qui sont normalement non miscibles avec de l'eau, grâce à un phénomène de réduction de tension de surface. Pour faire simple, les molécules de graisse sont réduites grâce aux propriétés hydrophobes du tensioactif et évacuées grâce aux propriétés hydrophiles.

**" L'impact environnemental...
un sujet d'un enjeu majeur. "**

En croissance depuis près de 80 ans, la production de tensioactifs avoisine aujourd'hui les 20 millions de tonnes et s'accroît encore suite à la pandémie de COVID-19 et aux recommandations de l'Organisation Mondiale de la Santé. Or, près de 96% des tensioactifs sont issus de la pétrochimie et donc du pétrole brut, une ressource non renouvelable pouvant être épuisée dans les prochaines décennies à venir. De plus, ces molécules ne sont pas biodégradables et l'usage de ce type de détergents, (lessive, liquide vaisselle, nettoyant pour les



Stratégie utilisée pour la synthèse de tensioactifs biosourcés à base de sucre.

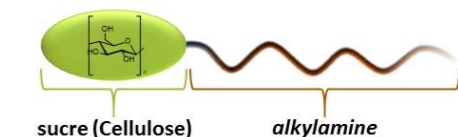


Schéma représentatif du tensioactif biosourcé.

sols...) génère une forte pollution des eaux. L'impact environnemental et sanitaire des tensioactifs d'origines pétro-sourcées est aujourd'hui un sujet d'un enjeu majeur. Les différents rapports du GIEC* montrent qu'il est nécessaire de changer drastiquement nos modes de consommation et de développer de nouvelles alternatives plus écologiques.

À l'IC2MP (Institut de Chimie des Milieux et Matériaux de Poitiers UMR7285 – CNRS/Université de Poitiers), les scientifiques étudient de nouvelles approches pour la production de tensioactifs issus de la biomasse dans le but de réduire l'empreinte carbone des détergents issus de la pétrochimie. Mais la biomasse, c'est quoi ? Elle désigne l'ensemble des matières organiques d'origine animale ou végétale pouvant être transformées en énergie ou en matières premières. Parmi elles, les sucres sont étudiés pour la production de tensioactifs biosourcés. De nombreuses recherches ont d'ores et déjà pu être menées en collaboration avec des entreprises. En effet, les industriels sont en quête de nouveaux tensioactifs "verts" aux propriétés équivalentes à ceux issus du pétrole brut.

LES TENSIOACTIFS À BASE DE SUCRE, UNE ALTERNATIVE ESSENTIELLE !

Aujourd'hui, les bioraffineries sont de plus en plus développées et permettent de valoriser la biomasse pour produire entre autres, des sucres pouvant être utilisés pour la fabrication de tensioactifs à moindre coût. Ces tensioactifs ont des propriétés très intéressantes telles qu'une faible toxicité pour l'homme et pour l'environnement ainsi qu'une forte biodégradabilité. De plus, ces matières premières, abondantes et renouvelables, sont peu coûteuses. Le tensioactif à base de sucre est structuré comme tel : la tête hydrophile est généralement constituée d'une molécule miscible avec l'eau telle qu'un sucre tandis que la partie hydrophobe est constituée d'une molécule ayant une affinité avec les matières organiques telle qu'un acide gras ou bien un alkylamine.

Bien que de nombreux tensioactifs à base de sucres soient déjà commercialisés comme les esters de sorbitan ou les alkyls de polyglucosides, ces produits demeurent toutefois peu nombreux sur le marché en raison de la difficulté à les développer. Les chercheurs de l'IC2MP ont pour objectif de mettre au point de nouvelles méthodes faciles à mettre en œuvre et écologiques pour la synthèse de tensioactifs biosourcés. Une de ces méthodes consiste à associer de la cellulose, molécule plateforme (c'est-à-dire qui sert à construire d'autres molécules) provenant de la biomasse, à un alkylamine par voie catalytique.

UNE MÉTHODE PROMETTEUSE

Les méthodes de synthèse des tensioactifs à base de sucres existantes aujourd'hui comportent deux ou plusieurs étapes. En général, la synthèse débute par une oxydation du groupement alcool du sucre qui réagira ensuite avec une amine pour former l'imine, intermédiaire, pouvant être réduit en amine en présence d'un catalyseur. Bien que ces techniques soient efficaces et bien maîtrisées de la part des industriels, elles sont cependant longues et coûteuses en énergie. Afin de développer un processus de synthèse plus écologique, plus rapide et générant moins de déchets, les chercheurs du laboratoire ont étudié un nouveau procédé de synthèse de tensioactifs biosourcés à base de sucre ne nécessitant qu'une seule et unique étape. Cette méthode a été réalisée en présence d'un catalyseur hétérogène récupérable et d'une pression de dihydrogène (hydrogène dans le langage courant) dans un réacteur sous pression qui génère uniquement de l'eau comme sous-produit. Ainsi, les trois étapes de synthèses nécessaires à la formation des tensioactifs se font en une seule et s'inscrivent dans le cadre d'une chimie respectueuse de l'environnement.

Cette réaction est difficile et nécessite l'utilisation d'un catalyseur. En effet, il augmente la vitesse de la réaction chimique réduisant ainsi fortement sa durée. De plus, dans ce cas, il permet de contrôler la sélectivité, c'est à dire de favoriser la formation du tensioactif souhaité (amine secondaire), par rapport à un autre. Cette réaction a été un succès en présence d'un catalyseur hétérogène (solide) à base de ruthénium sous atmosphère de dihydrogène pouvant être réutilisé jusqu'à dix fois pour produire le même résultat. Il ne reste plus qu'à étudier les propriétés physico-chimiques de ces différents tensioactifs biosourcés et de savoir s'ils peuvent être aussi performants que ceux disponibles sur le marché.

Hana BENSALÉM < IC2MP
hana.bensalem@univ-poitiers.fr

Sophie HAMEURY < IC2MP
sophie.hameury@univ-poitiers.fr

Karine DE OLIVEIRA VIGIER < IC2MP
karine.vigier@univ-poitiers.fr

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

* Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat.

Ces sels qui rongent le patrimoine

Préserver le patrimoine pour le transmettre aux générations futures nécessite de prévenir et d'analyser ses détériorations. L'expertise en absorption atomique de l'IC2MP apporte des éléments de réponses sur ces sels qui agressent les édifices.



© Yves Almécija

Les sels recueillis sur les monuments sont mis en solution puis filtrés. Les échantillons liquides sont analysés à l'IC2MP par absorption atomique de flamme.

Notre patrimoine bâti est soumis à de nombreuses sollicitations de son environnement : infiltrations d'eaux pluviales, variations thermohygrométriques, pollution atmosphérique, circulations d'eaux chargées, usages multiples par l'homme et ses activités... Tant de changements qui, au fil du temps, s'accumulent pour dégrader les divers matériaux du patrimoine et compliquent la tâche des conservateurs, restaurateurs et architectes spécialisés.

LA FAUTE AUX SELS DISSOUS

Le plus connu des sels solubles dans les maçonneries est sans aucun doute le salpêtre. Ce sel, présent dans nos caves, est principalement issu de la décomposition de matières organiques du sol (infiltrations, engrais) ou d'actions humaines volontaires (salpêtrière pour fabrication de poudre à canon).

Cependant, près d'une cinquantaine de composés chimiques concerne les sels solubles présents dans le patrimoine. Ceux-ci sont composés d'un anion, chargé négativement, et d'un cation, chargé positivement. Les anions les plus fréquents sont les carbonates, les sulfates, les chlorures, les nitrates et les oxalates. Les cations les plus couramment associés à ces anions sont le calcium, le magnésium, le sodium, le potassium et l'ammonium. Tous ces éléments peuvent se combiner, sous des formes simples, comme l'halite (le sel de mer ou de table), jusqu'à des sels plus complexes comme l'ettringite.

LES PRINCIPAUX RISQUES

Certains sels, dit hygroscopiques, peuvent se présenter sous différentes formes cristallines suivant les conditions de pression, de température et d'humidité atmosphérique, dont la différence est principalement l'état d'hydratation. Lors du passage d'un état à un autre, le sel cristallisé

mobilisera un certain nombre de molécules d'eau et, par conséquent, occupera un espace variable. Ces changements d'état répétés entraîneront de fortes dégradations du matériau (pierres, mortiers, ...). Par exemple, les sulfates de sodium peuvent apparaître sous trois formes plus ou moins riches en molécules d'eau : la thénardite (anhydre), la mirabilite (décahydratée) et une forme heptahydratée, métastable.

Le changement de phase (de solide à liquide et inversement) dépend des conditions thermiques et hygriques. La thénardite possède une humidité relative d'équilibre de 82% à 20°C. Au-dessus de cette valeur d'humidité relative de l'atmosphère, elle devient déliquescence (elle emmagasine l'humidité de l'air, elle se liquéfie), avec un passage progressif vers la mirabilite. Ces conditions climatiques sont fréquemment enregistrées dans les matériaux du patrimoine, et la présence de ces sels entraîne de nombreuses dégradations des matériaux poreux. Dans le cas des décors peints, la migration des sels, entraînée par l'évaporation, génère une surconcentration des cristallisations sur la surface des enduits. Ces cristallisations endommagent les revêtements muraux, en particulier les peintures, très présentes dans l'art roman. Des décors de type fresque (décoration par pigmentation d'un enduit frais) peuvent ainsi être recouverts par ces cristallisations, nuisant à leur lecture par le visiteur ou l'historien. L'identification, le traitement voire l'élimination des sels solubles permet alors de restaurer le décor original et son appréciation.

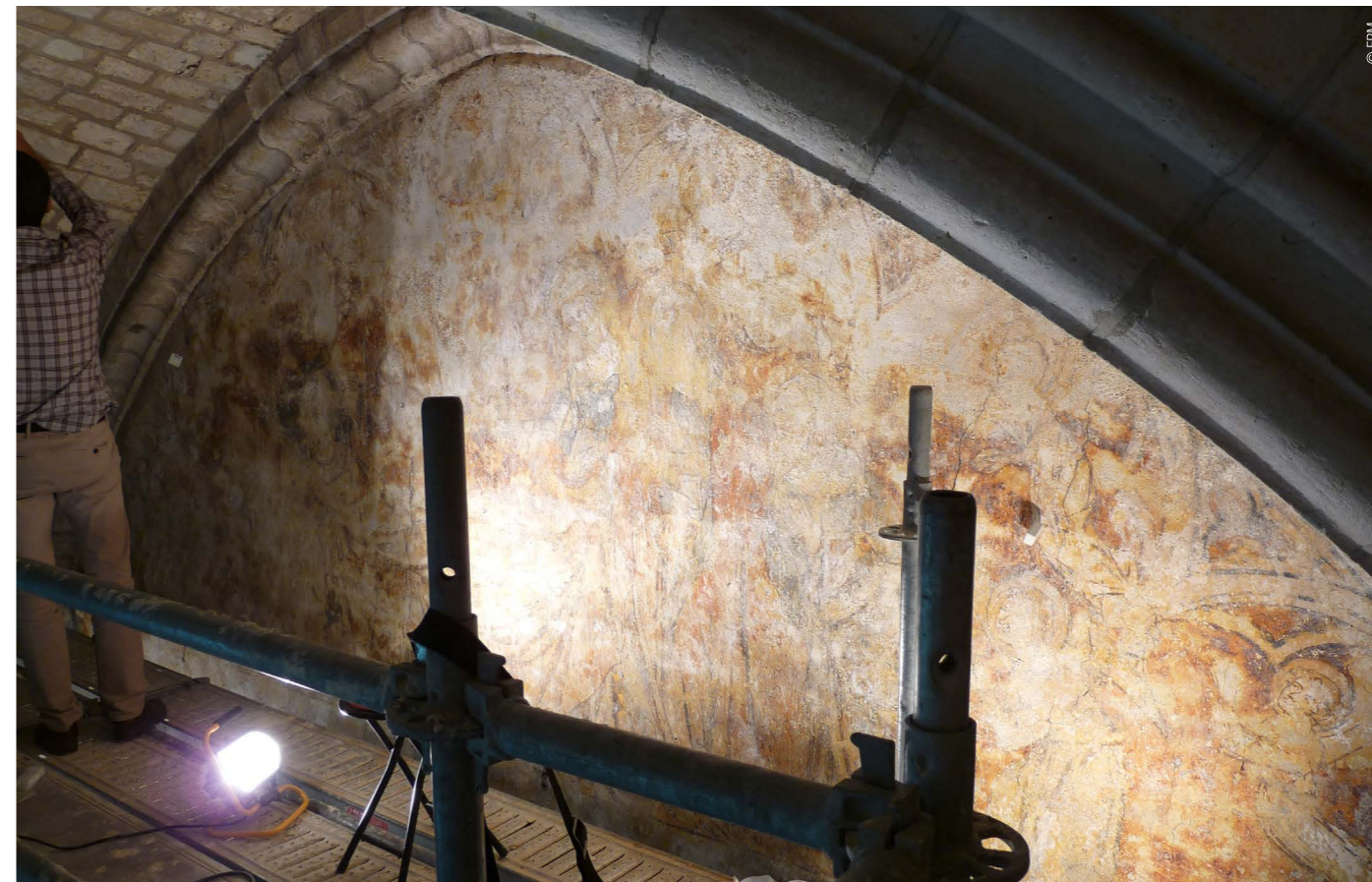
"... cette eau liquide provoque des développements biologiques importants..."

Enfin, les sels hygroscopiques, en fonction de l'humidité relative ambiante, changent d'état en association avec une quantité variable de molécules d'eau. Lorsque la présence de ces sels est importante, ils jouent le rôle des absorbeurs d'humidité exactement comme ceux que l'on trouve dans le commerce. Dans une maçonnerie, le même principe est observé : sur le long terme, la présence continue de cette eau liquide provoque des développements biologiques importants, notamment de champignons et d'algues, qui à leur tour peuvent altérer les surfaces.



© ERM

Altérations et cristallisations sur une pierre de Tuffeau, Hôtel de ville de La Rochelle, cour.



© ERM

Développement d'un voile blanc et altération par écailllements d'une peinture murale, Cathédrale de Chartres, salle capitulaire.

UNE ANALYSE PRÉCISE PAR ABSORPTION ATOMIQUE

Pour caractériser la quantité de sels présents dans les échantillons prélevés sur les monuments, la spectrométrie d'absorption atomique est particulièrement adaptée. Elle permet le dosage des cations (sodium, potassium, calcium et magnésium) dans des échantillons liquides avec une précision de l'ordre du milligramme par litre. L'analyse repose sur la mesure des éléments à l'état d'atomes libres.

Un atome existe dans des états d'énergie définis. Pour passer de l'état fondamental à l'état excité, il faut fournir un quantum d'énergie. L'énergie produite, peut être d'origine thermique ou photonique. Cette énergie correspond à une onde électromagnétique de longueur d'onde définie. L'absorption se produit quand l'atome dans l'échantillon absorbe une radiation lumineuse de longueur d'onde spécifique, issue d'une lampe à cathode creuse. À haute température (2 500°C), les atomes passent de l'état fondamental à l'état excité. Cette phase est instable et l'atome retourne immédiatement à son état initial en libérant une énergie lumineuse. Un détecteur mesure cette énergie émise et la transforme en signal électronique. L'intensité de ce signal convertie en absorbance, correspond à la quantité d'élément dans l'échantillon, par exemple du sodium.

Un étalonnage externe est réalisé à partir d'étalons de référence certifiés ISO 9001. Cet étalonnage s'obtient en mesurant l'absorbance des étalons certifiés à concentrations progressives et précises, de 0,1 à 1 mg/L. La concentration de l'échantillon est alors déterminée en rapportant sa valeur d'absorbance sur la droite d'étalonnage de référence. Si l'absorbance de l'échantillon dépasse l'absorbance maximum de l'étalon certifié, alors l'échantillon est dilué.

UN PARTENARIAT PUBLIC/PRIVÉ

Les domaines d'application de l'absorption atomique sont multiples et variés. La technique est par exemple utilisée dans le cadre de la recherche à l'IC2MP (UMR7285 – CNRS/Université de Poitiers) pour analyser des matériaux dédiés à la conception de catalyseurs bimétalliques pour optimiser les réactions chimiques. C'est donc tout naturellement que le laboratoire privé Etudes Recherches Matériaux (ERM) qui travaille depuis plusieurs dizaines d'années sur la caractérisation des altérations touchant le patrimoine bâti a lié des liens privilégiés de partenariat avec l'IC2MP. ERM combine plusieurs approches pour l'identification des altérations des matériaux qui s'avèrent indispensables pour déterminer les dégradations en cours, en définir leurs origines et protéger les pierres, mortiers et peintures murales.

Cette collaboration étroite d'ERM avec les scientifiques de l'IC2MP permet de proposer des services toujours plus pertinents aux propriétaires (collectivités, privés...) d'édifices remarquables. Elle donne aussi lieu à des investissements communs et à des financements de thèses CIFRE. Les coopérations nombreuses ont été décisives dans l'obtention d'un projet de France Relance en juin 2022 entre ERM et l'Université de Poitiers qui prendra la forme d'un post-doctorat à l'IC2MP, pour la cartographie d'émissions radioactives dans les matériaux poreux.

Christelle ROUDAUT < IC2MP
christelle.roudaut@univ-poitiers.fr

Benoit MERCKX < ERM
benoit.merckx@erm-poitiers.fr

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

à venir...

Colloques

Journées annuelles MuFoPAM

Rencontre autour de la MultiFonction des Peptides Antimicrobiens.

<https://mufofam.cnrs.fr/2022/07/01/les-journees-annuelles-de-2022/>

19-21 oct. Amboise

34^e colloque Biotechnocentre

Sciences de la Vie, de la Santé et du Bien-Être en région Centre-Val de Loire.

<http://www.biotechnocentre.fr/34e-colloque/>

20-21 oct. Nouan-Le-Fuzelier

Les mares, un patrimoine...

Les mares, un patrimoine naturel construit, un patrimoine culturel négligé.

<https://mares-laon-2022.sciencesconf.org/>

20-22 oct. Laon

18^{èmes} journées de l'Hydrodynamique

Chercheurs et ingénieurs se rassemblent autour de l'hydrodynamique marine et navale

<https://jh2022.sciencesconf.org>

22-24 nov. Poitiers

RNE 2022

Échanges et état des lieux sur l'état des populations de mammifères marins.

<https://www.observatoire-pelagis.cnrs.fr/echoouages/seminaires-me/>

19-20 nov. Saint-Valery-sur-Somme

Les rencontres de Physique des Particules

Les physiciens des hautes énergies échangeront sur leurs avancées en physique des particules.

<https://indico.math.cnrs.fr/event/7737/>

5-8 déc. Orléans

CONGRÈS

organisé par
l'APTEN Poitiers
et l'IC2MP

JIE 2022

Journées Information Eau

11-12-13 octobre
à l'ENSI Poitiers

Changements climatiques et eau
Eau potable
Eaux résiduaires urbaines et industrielles
Assainissement
Circuits de refroidissement
Entartrage - Eaux de chaudière
Qualité des milieux

APTEN 50 ans
Association Professionnelle de Traitement des Eaux et des Milieux

IC2MP
Institut de Chimie des Milieux et Matériaux de Poitiers



25^e
édition

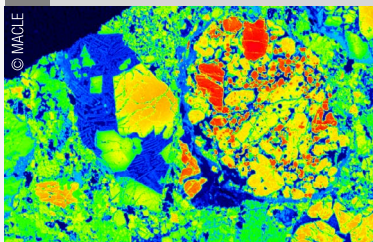
3 salles,
102 communications,
20 exposants, 450 participants

avec le soutien de



Inscriptions : <https://jie.apten.org> - Renseignements : contact@apten.org

SFμ JUNIOR 2022



COLLOQUE - La Société Française des Microscopies réunit chercheurs, doctorants et post-doctorants.

<http://junior.sfm.fr/fr/accueil.php>

2-4 nov. Orléans

ÉCOLE THÉMATIQUE DES RESSOURCES MINÉRALES



ÉCOLE THÉMATIQUE - Ressources minérales : approvisionnement responsable et transitions.

<https://www.brgm.fr/fr/evnement/atelier/ecole-thematique-ressources-minerales-2022>

14-17 nov. Orléans