

# microSCOOP

Un regard sur les laboratoires CNRS en Centre Limousin Poitou Charente

n°90 - juillet 2024

## Les bisphénols : quels risques pour la fertilité féminine ?

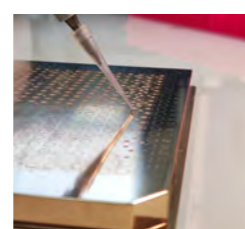
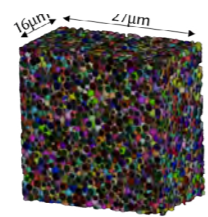
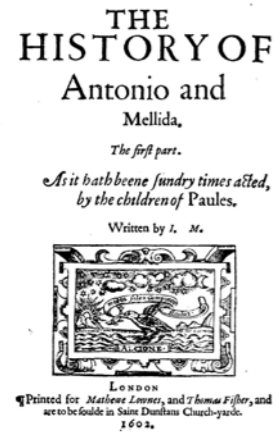
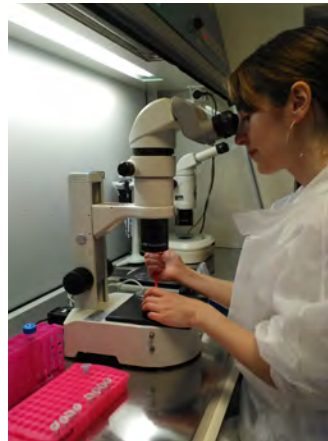
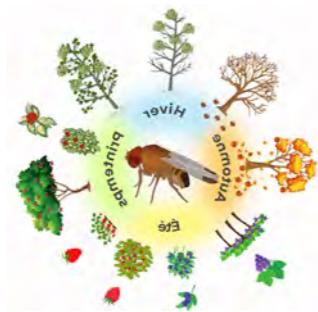
L'invasion du monde  
par *Drosophila suzukii*,  
une mouche des fruits  
très opportuniste

Les microstructures céramiques  
à la loupe grâce à l'intelligence  
artificielle

Ilot de chaleur urbain :  
le sujet chaud de  
la ville de  
demain



cnrs



ISSN 1291-8083

Photo couverture : Des ovocytes de brebis sont mis en culture pour une étape de maturation avec ou sans BPS à différentes concentrations. © PRC

## 4 Biologie

- L'invasion du monde par *Drosophila suzukii*, une mouche des fruits très opportuniste
- Les bisphénols : quels risques pour la fertilité féminine ?
- MO<sup>2</sup>VING : explorer la vie, de la molécule au petit animal

## 10 Chimie

- PFAS : faire et défaire, c'est toujours de la chimie

## 12 Environnement

- Ilot de chaleur urbain : le sujet chaud de la ville de demain

## 14 Matériaux

- Les microstructures céramiques à la loupe grâce à l'intelligence artificielle

## 16 Histoire

- Le théâtre de John Marston, ou l'audace d'une langue qui s'invente

## 18 Actualités

# Éditorial

Comment donner l'envie de lire ce nouveau numéro de Microscop ? C'est un défi à relever pour chacun des numéros ! Pour les concepteurs et les contributeurs, c'est une évidence ! Mais pour celui ou celle qui reçoit ce magazine... Comment ne pas l'abandonner sur un coin de bureau... Comment ne pas se dire "on le lira plus tard" et puis l'oublier... L'intérêt d'un magazine papier, c'est de perdurer dans le temps et de ne pas disparaître au milieu d'une multitude de newsletters ou de mails. Les vacances d'été sont souvent un moment propice à la lecture, alors embarquons Microscop dans nos valises !

Dans ce numéro d'été, quatre articles touchent à notre environnement. Il est en effet important de s'en préoccuper et de chercher à le comprendre pour le sauvegarder voire pour s'en inspirer. Les données scientifiques partagées à travers le monde mettent en évidence la dégradation des conditions de vie dans nos villes. Le cloporte de Poitiers pourrait nous apporter des données précises sur les méfaits d'une architecture trop minérale. À l'inverse, la mouche *Suzukii*, insecte ravageur venu d'Asie, s'implante dans nos cultures et insère ses œufs y compris dans des fruits qui ne sont pas mûrs. Quels ressorts active-t-elle pour s'adapter à tout ? C'est à Tours que l'énigme est en cours de résolution. Tout ceci pourrait presque être anxiogène si les scientifiques ne se penchaient pas sur l'ingénierie biologique que ces petites bêtes sont capables d'activer pour survivre et s'adapter. Ce Microscop ne se fait pas l'écho de ces seuls travaux. Deux autres sujets abordent toute la difficulté de renoncer ou de trouver la parade à des molécules chimiques qui impactent la santé humaine. Extrêmement utilisées dans l'industrie, elles sont aujourd'hui à peu près partout, dans les sols, dans l'air, dans l'eau et dans les organismes vivants où elles induisent des dommages. La recherche fondamentale a un rôle essentiel. Sans pouvoir complètement défaire ce qui a été fait depuis de nombreuses années, elle trouve des explications et envisage des solutions. Comment ? Avec des outils technologiques de pointe, structurés souvent en plateforme comme avec MO<sup>2</sup>VING à Orléans ou en mobilisant l'intelligence artificielle comme à Limoges. Tous ces travaux, à l'image de tous les événements qui les mettent en lumière, participent à faire progresser les connaissances et à les mettre au service de la société, comme le CNRS en a fait sa devise.

Je vous souhaite une très bonne lecture et de très belles vacances estivales !



Ludovic Hamon  
Délégué régional

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



# L'invasion du monde par *Drosophila suzukii*, une mouche des fruits très opportuniste

Chaque année les pertes agricoles liées aux ravageurs de culture sont estimées à plusieurs milliards d'euros dans le monde. Parmi ces ravageurs, la mouche exotique envahissante *Drosophila suzukii*, aussi appelée drosophile à ailes tachetées, a beaucoup fait parler d'elle. Cette mouche a littéralement envahi tous les continents en l'espace de 10 ans.



*Drosophila suzukii*

## UNE ORIGINALITÉ DESTRUCTIVE

Contrairement aux autres mouches que l'on retrouve autour de notre corbeille à fruits en été, *Drosophila suzukii* ne s'attaque pas ou peu aux fruits en décomposition. Elle préfère les fruits à peine mûrs. Pour s'y attaquer, elle possède un organe spécialisé très original, un ovipositeur dentelé en forme de scie, qui lui permet d'insérer ses œufs dans des fruits pourtant durs. Ainsi, dans les exploitations fruitières, elle infeste les fruits avant même qu'ils aient atteint leur pleine maturité. Ces fruits subissent la voracité de ses asticots. La ponte étant aussi la porte d'entrée de bactéries et moisissures, les fruits pourrissent plus vite et leur commercialisation devient alors impossible.

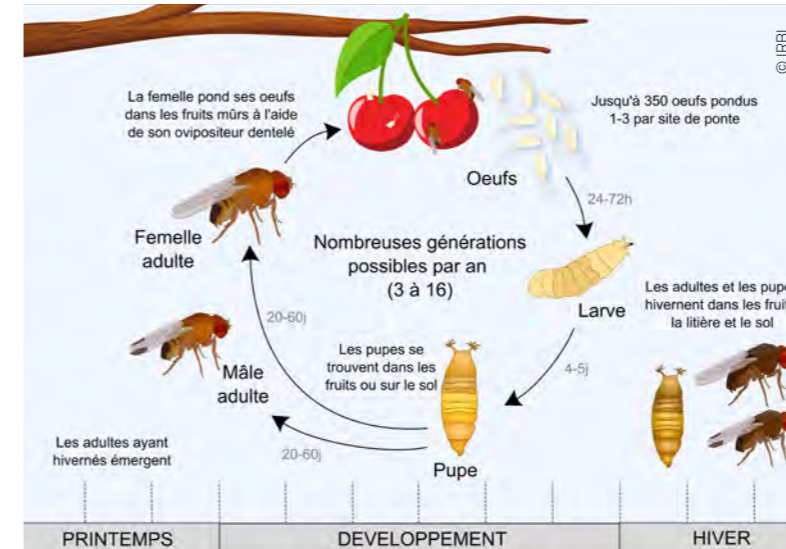
## UN RAVAGEUR VENU D'ASIE

Les dégâts causés par *Drosophila suzukii* sont relativement récents sous nos latitudes. En effet, il s'agit d'une espèce exotique envahissante, dite "invasive". Sa première détection en Europe date de 2008 et elle est arrivée en France en 2010. Dès lors, son aire d'invasion n'a cessé de s'étendre. Elle est désormais présente sur le continent américain, ainsi qu'en Afrique. Depuis, les recherches se

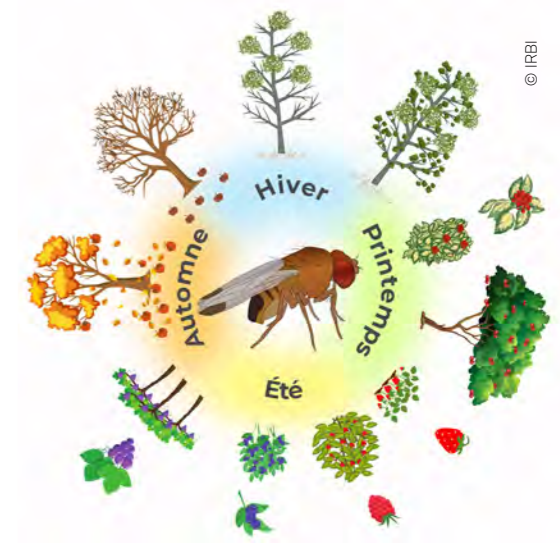
multiplient, aussi bien sur des aspects fondamentaux qu'appliqués. Parmi les objectifs des travaux appliqués, il s'agit, entre autres, de se prémunir des dégâts qu'elle induit tout en limitant l'usage des pesticides dans une approche de lutte intégrée. Côté fondamental, *Drosophila suzukii* est un modèle de choix pour étudier l'impact des espèces invasives sur les communautés d'insectes et de plantes natives, ou encore explorer l'étendue des adaptations physiologiques d'une espèce invasive en pleine réussite.

## UNE ADAPTABILITÉ À TOUTE ÉPREUVE

La force de cette drosophile réside dans une adaptabilité et une plasticité hors normes au niveau physiologique et comportemental. En fonction des saisons, sa distribution au sein des écosystèmes change : majoritairement présente dans les cultures fruitières lors de la saison de récolte (mai - septembre), elle trouve refuge dans les forêts et habitats semi-naturels durant la saison froide (octobre-avril). Ses périodes de vol sont également adaptées aux températures : à l'aube et au crépuscule en été pour éviter les fortes chaleurs ; au milieu de la journée en hiver pour profiter de températures plus douces. Mais ce n'est pas tout, elle



Cycle de vie de *Drosophila suzukii*.



Exemple de continuum de ressources pour *Drosophila suzukii* tout au long de l'année.

présente aussi un "morphe hivernal", une version de l'insecte mieux équipée pour l'hiver, avec une couleur plus sombre et une meilleure résistance au froid grâce, entre autres, à la thermorégulation comportementale. Elle possède également des ailes plus grandes lui permettant de parcourir de longues distances pour trouver des zones de refuge ou de nourrissage. Enfin, cette mouche pleine de surprises peut aussi héberger une bactérie symbiotique bien connue chez d'autres insectes : *Wolbachia*. Le rôle joué par *Wolbachia* dans cette collaboration non-obligatoire est encore mal connu mais elle semble agir à la fois dans la préférence nutritionnelle et dans la préférence thermique.

## " une capacité à se développer dans une multitude de fruits différents "

### FRUITS CULTIVÉS, FRUITS POURRIS, FRUITS SAUVAGES : TOUT EST BON POUR LA MOUCHE !

*Drosophila suzukii* est bien connue pour les ravages qu'elle cause aux fruits cultivés (cerises, fruits rouges, raisins), beaucoup moins pour son utilisation d'autres fruits non cultivés. Pourtant, en dehors des périodes de récolte, elle trouve de quoi subsister grâce à une polyphagie poussée à l'extrême, c'est à dire une capacité à se développer dans une multitude de fruits différents. En automne, les fruits délaissés aux pieds des arbres constituent une ressource alternative qui permet un premier continuum entre les fruits d'été et les fruits d'hiver et de début de printemps. C'est le cas des pommes par exemple, qui, pourrissant au pieds des pommiers, abritent une communauté de drosophiles décomposeurs mais aussi *Drosophila suzukii*. En hiver et au début du printemps, un fruit sauvage bien connu des fêtes de fin d'année, le gui, constitue une ressource de choix également. À cette période, elle profite également des fruits des plantes ornementales retrouvées dans les jardins ou zones urbaines, comme *Aucuba japonica* ou *Mahonia japonica*. Ces fruits, exempts de compétition avec d'autres insectes, sont le lit des premières générations de mouches qui attaquent les fruits cultivés au printemps.

### DROTHERMAL, UN PROJET, QUATRE LABORATOIRES

Depuis 2021, l'Institut de Recherche sur la Biologie de l'Insecte (IRBI, UMR 7261 CNRS/Université de Tours) a pris part à un projet transdisciplinaire\* financé par l'Agence Nationale de Recherche qui consiste en une approche intégrative de l'étude de *Drosophila suzukii*. Tous travaillent conjointement pour mieux décrire l'écologie trophique et thermique du ravageur, incluant les variations saisonnières, pour ainsi améliorer les modèles prédictifs utiles dans le cadre d'une lutte intégrée pour l'agriculture. L'IRBI en particulier explore les propriétés de la mouche en lien avec la thermorégulation comportementale pour mieux comprendre à quel point sa flexibilité (ou plasticité) joue un rôle dans le succès de son invasion.

Ce projet DroThermal résout "impliqué" creuse des aspects fondamentaux de son écologie et de sa physiologie afin d'ouvrir potentiellement de nouvelles possibilités de lutte ou de contrôle de ce ravageur. À l'heure actuelle, bien que des pistes soient investiguées, il n'existe encore aucun moyen de lutte environnementalement acceptable et durable contre cette espèce invasive. Ironiquement, l'un des pays qui investit le plus dans l'amélioration des connaissances sur cette espèce est aussi un des tous derniers pays encore non colonisés par la mouche, l'Australie.

Gwenaëlle DECONNINCK - IRBI  
deconninck@univ-tours.fr  
Sylvain PINCEBOURDE - IRBI  
sylvain.pincebourde@univ-tours.fr  
Olivier CHABRERIE - EDYSAN  
olivier.chabrerie@u-picardie.fr  
<https://irbi.univ-tours.fr/>

\* Ce projet implique trois autres laboratoires : EDYSAN (Écologie et Dynamique des Systèmes Anthropisés, UMR 7058 CNRS/Université Picardie Jules Verne), ECOBIO (Ecosystèmes, Biodiversité, Evolution, UMR 6553 CNRS/Université de Rennes) et le LBBE (Laboratoire de Biométrie et Biologie Evolutive, UMR 5558 CNRS/Université de Lyon).

# Les bisphénols : quels risques pour la fertilité féminine ?

Le laboratoire Physiologie de la Reproduction et des Comportements a utilisé plusieurs modèles d'étude, à la fois dans l'espèce humaine mais aussi dans l'espèce ovine, pour évaluer l'impact des bisphénols.

La santé de l'être humain est dépendante de son environnement et de ses perturbations. Quotidiennement, nous sommes exposés à des contaminants environnementaux dont certains ont des activités de perturbateurs endocriniens, via l'alimentation, l'air respiré, les cosmétiques, les vêtements... Ces substances chimiques, naturelles ou artificielles, seules ou en mélange, altèrent le fonctionnement du système endocrinien et de ses hormones en modifiant la production, le stockage, le transport ou l'élimination des hormones. Ils provoquent des effets néfastes dans l'organisme ou celui des descendants.

Cette exposition chronique aux perturbateurs endocriniens peut être à l'origine de maladies : cancers, pathologies respiratoires, maladies cardiovasculaires, diabète, troubles de la reproduction.

## LE BISPHÉNOL A, LE PLUS CONNU DES BISPHÉNOLS

Les bisphénols sont des molécules de synthèse employées pour la fabrication de plastiques. Le bisphénol A (BPA) a été particulièrement utilisé dans les plastiques polycarbonates (dispositifs médicaux, compact-disc, bonbonne d'eau). On le retrouve aussi dans certaines résines époxy (présentes dans les circuits imprimés, certains matériaux dentaires, cannettes, boîtes de conserve). Il sert encore comme révélateur des papiers thermiques (tickets de caisse).

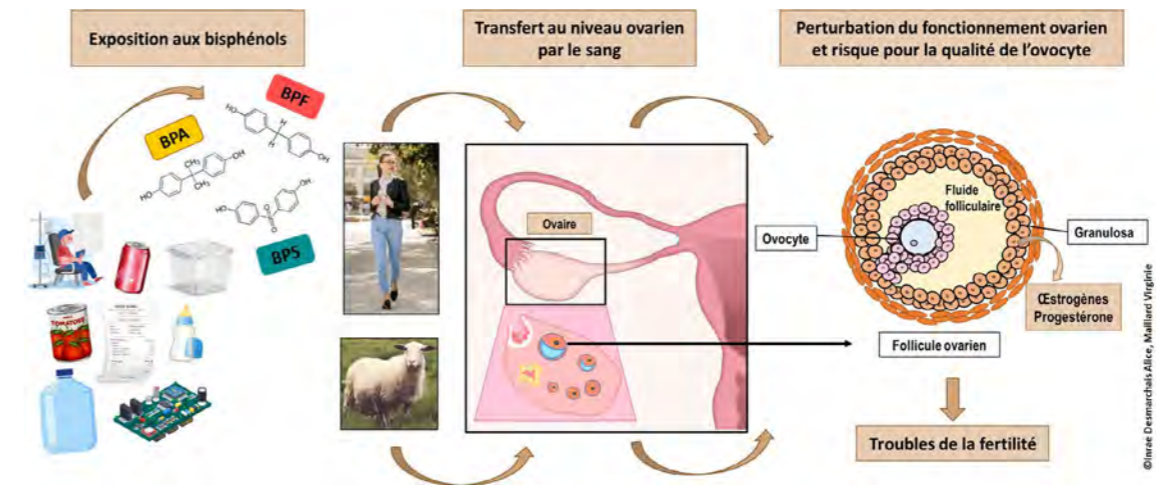
Cette molécule est métabolisée rapidement par l'organisme pour être éliminée dans les urines en moins de 24 h. Cependant, l'exposition chronique par voies orale, respiratoire, ou dermique rend sa présence fréquente dans le sang, les urines mais aussi dans le fluide folliculaire, ce liquide biologique du follicule ovarien dans lequel se trouve le gamète femelle appelé ovocyte. Dès les années 2000, le BPA est suspecté d'être reprotoxique, c'est-à-dire qu'il pourrait altérer la fertilité de l'homme ou de la femme, ou altérer le développement de l'enfant à naître. En France, le BPA est successivement interdit dans les dispositifs en contact avec les enfants de moins de 3 ans (2011), puis dans les emballages alimentaires (2015), et enfin dans les tickets de caisse (2016). Plusieurs études ont montré que le bisphénol A affecte la santé en provoquant

des troubles immunitaires, cardiovasculaires, des cancers, l'obésité et aussi des troubles de la fertilité. L'agence européenne des produits chimiques a alors classé le BPA comme substance reprotoxique avérée en 2014, puis comme perturbateur endocrinien en 2017. A partir de là, les industriels ont peu à peu remplacé le BPA par d'autres bisphénols aux structures chimiques très proches : les bisphénols S (BPS), F (BPF) ou AF (BPAF).

## " l'ovocyte en contact avec ces bisphénols "

### SOMMES-NOUS EXPOSÉS À D'AUTRES BISPHÉNOLS ?

L'exposition de l'être humain à ces différents bisphénols est avérée dans plusieurs pays. En France, l'étude ESTEBAN (Etude Santé sur l'Environnement, la Biosurveillance, l'Activité physique et la Nutrition) a montré que le BPA, mais aussi les BPS et BPF étaient présents dans les urines d'individus âgés de 6 à 74 ans entre 2014 et 2016. Le laboratoire Physiologie de la reproduction et des comportements (PRC, UMR 7247 CNRS/Université de Tours /INRAE), en partenariat avec le CHRU de Tours, a mis en évidence que, au sein du follicule ovarien, le fluide folliculaire de 23 % des femmes d'une cohorte de plus de 300 patientes ayant recours à la procréation médicalement assistée (PMA) présentait des traces de contamination par le BPA, BPS et BPF. Ainsi les cellules folliculaires ovariennes telles que les cellules de granulosa et l'ovocyte sont en contact avec ces bisphénols.



Exposition aux bisphénols et risques pour la fertilité femelle. L'exposition aux bisphénols se produit principalement par les voies alimentaire, cutanée et aérienne. Ces molécules atteignent le sang puis le fluide folliculaire chez la femme et peuvent perturber le fonctionnement de l'ovaire et induire un risque pour la qualité de l'ovocyte et la fertilité.

© Insee Desmarchais Alice, Maillard Virginie

Chez la femme, la fertilité repose sur la capacité à produire un ovocyte apte à être fécondé et à générer un embryon viable. Ce fonctionnement est dépendant de la production d'hormones (stéroïdes), telles que l'œstradiol et la progestérone, par les cellules ovariennes. Le laboratoire PRC s'est interrogé sur les conséquences de l'exposition à un ou plusieurs analogues du BPA, d'une part sur l'ovocyte et d'autre part sur le fonctionnement des cellules de granulosa, sécrétant l'œstradiol et la progestérone, stéroïdes essentiels à la reproduction. Pour cela, le laboratoire a utilisé plusieurs modèles d'étude, à la fois dans l'espèce humaine mais aussi dans l'espèce ovine. En effet, la brebis présente une physiologie de l'ovaire similaire à celle de la femme et une bonne sensibilité aux toxiques (au contraire des rongeurs) permettant d'étudier les effets des bisphénols sur l'ovocyte mais également, sur l'animal entier.

En outre, d'autres bisphénols (BPF, BPAF, BPAP, BPE et BPB) ont des effets similaires sur les cellules de granulosa humaines. Lorsque ces cinq bisphénols sont utilisés en cocktail avec les BPS et BPA, la diminution de la sécrétion de progestérone par les cellules de granulosa est même amplifiée. Il existe donc bien un effet cumulé des bisphénols sur l'activité stéroïdienne des cellules de granulosa.

### DES EFFETS DIFFÉRENTS SELON LA CORPULENCE

Afin de vérifier si l'effet du BPS varie en fonction du statut d'engraissement de l'individu, des brebis maigres ou grasses ont ingéré dans leur ration, quotidiennement pendant 3 mois, du BPS, à la dose de 50 µg/kg/jour (correspondant à la dose journalière tolérable définie en 2006 pour le BPA). Dans cette expérience, le BPS induit la baisse de la concentration de progestérone du liquide folliculaire au moment de l'ovulation des brebis, de manière équivalente chez les femelles maigres ou grasses. En revanche, le BPS influence de manière différente les concentrations en œstrogènes selon le statut corporel.

Finalement, les analogues du BPA, dont le BPS, ont un effet délétère sur le fonctionnement de l'ovaire et ne sont pas des alternatives satisfaisantes au BPA. Il est crucial de considérer les expositions multiples et de prendre en compte les effets cumulatifs et / ou synergiques, mais également le statut d'engraissement individuel pour mieux comprendre les effets des perturbateurs endocriniens et leur impact sur la fertilité. Des recherches sont actuellement en cours pour améliorer la compréhension des mécanismes d'action des bisphénols et contribuer ainsi à fournir des éléments de réflexion essentiels aux prises de décisions réglementaires vis-à-vis de ces contaminants.

Alice DESMARCHAIS - PRC  
alice.desmarchais@inrae.fr

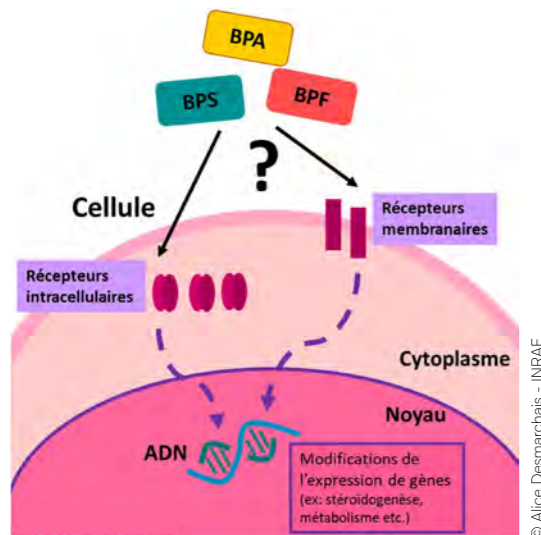
Sébastien ELIS - PRC  
sebastien.elis@inrae.fr

Virginie MAILLARD - PRC  
virginie.maillard@inrae.fr

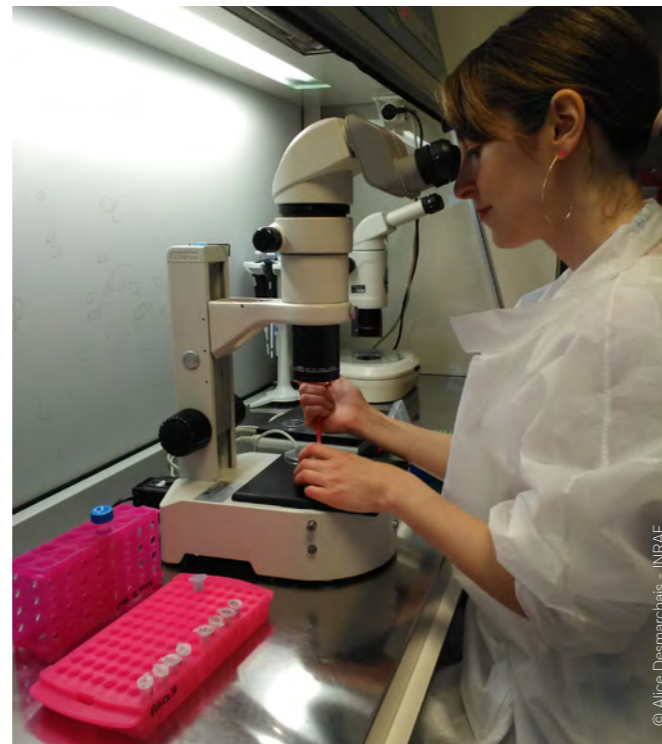
<https://physiologie-reproduction-comportements.val-de-loire.hub.inrae.fr/>

<https://umrprc-bingo.val-de-loire.hub.inrae.fr/>

\* Processus permettant à l'ovocyte d'atteindre le stade méiotique nécessaire à la fécondation.



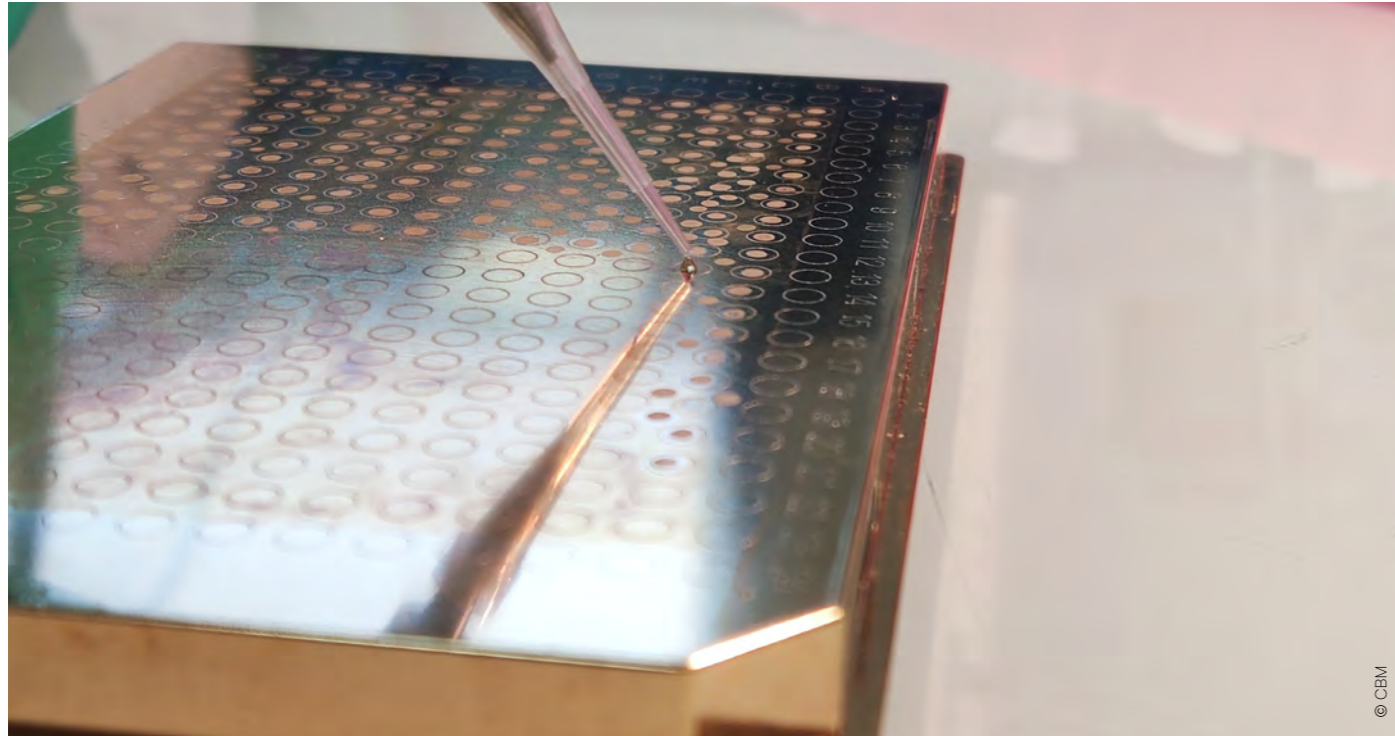
Mécanismes d'action des bisphénols.



Des ovocytes de brebis sont mis en culture pour une étape de maturation avec ou sans BPS à différentes concentrations.

# MO<sup>2</sup>VING : explorer la vie, de la molécule au petit animal

La concentration de multiples techniques et expertises scientifiques complémentaires a conduit deux laboratoires à s'unir pour créer la plateforme technologique MO<sup>2</sup>VING dédiée à la compréhension de dysfonctionnements à l'origine de certaines maladies.



Réalisation d'un dépôt en couche ultra-mince sur cible plaquée or pour l'analyse de bioconjugués en spectrométrie de masse MALDI-TOF.

Le Centre de biophysique moléculaire (CBM) et le laboratoire Transgénése et archivage d'animaux modèles (TAAM) poursuivent des recherches qui s'étendent de la caractérisation moléculaire de biomolécules à l'imagerie multi-échelle, de la cellule au petit animal. Ils ont réuni leurs compétences et moyens expérimentaux qu'ils ont nommé MO<sup>2</sup>VING, où sont mobilisés 18 scientifiques : ingénieurs, chercheurs et enseignants-chercheurs. MO<sup>2</sup>VING intervient ainsi dans différents domaines, notamment la cancérologie, la résistance aux antibiotiques, l'inflammation, la thérapie génique, la neurologie, la cosmétique et le phénotypage d'animaux transgéniques ou mutants. La plateforme dispose de cinq grands dispositifs : RMN, spectrométrie de masse, imagerie cellulaire, IRM, exploration fonctionnelle et anatomique. Elle est animée par des chimistes, des biologistes, des biochimistes et des biophysiciens. Elle est ouverte à la communauté scientifique régionale, nationale et internationale, aussi bien aux laboratoires publics qu'aux entreprises privées. Mais quelles recherches ou analyses peut-on réaliser avec MO<sup>2</sup>VING ?

## UN ZOOM SUR LA STRUCTURE DES PROTÉINES

Essentielles à tous les organismes vivants, les protéines sont impliquées dans la plupart des processus biologiques. Elles constituent des cibles thérapeutiques, des médicaments ou encore des biopesticides potentiels. Comprendre la fonction de ces "super actrices" de la vie quotidienne implique forcément d'en étudier la structure. Intervient alors la RMN grâce à laquelle les scientifiques déterminent la structure tri-dimensionnelle de protéines d'intérêt

et analysent leur repliement spatial, notamment les sites actifs et les domaines d'interaction, pour en déduire leur mécanisme d'action.

## QUAND LA CHIMIE RENCONTRE LA BIOLOGIE

Les protéines sont par ailleurs largement employées dans le développement de bioconjugués. Un bioconjugué est une molécule hybride résultant de la combinaison d'une biomolécule (une protéine ou un acide nucléique) avec une autre substance, comme un médicament ou un colorant fluorescent. Cette association, réalisée grâce à des réactions chimiques, permet de modifier les propriétés de la biomolécule ou de lui conférer de nouvelles fonctions, utiles par exemple en recherche médicale ou en diagnostic. C'est là que les scientifiques font appel à la spectrométrie de masse. Cet outil joue un rôle essentiel dans le développement et la caractérisation des bioconjugués en contrôlant leur composition et en localisant les sites de réactions sur la biomolécule d'intérêt.

## RÉVÉLER LES MÉTABOLITES

De multiples réactions chimiques se produisent dans un organisme. La métabolomique étudie l'ensemble de ces phénomènes avec l'analyse de différents échantillons biologiques comme des plasmas, des urines ou des extraits bactériens, cellulaires et tissulaires. Les scientifiques peuvent ainsi identifier ce qu'ils appellent des métabolites clés (sucres, acides aminés, acides gras, etc.) impliqués dans un processus physiologique ou pathologique.

Cette approche fournit des informations précieuses sur les perturbations associées à certaines maladies, ouvrant ainsi de nouvelles voies pour la découverte de nouveaux médicaments. Différentes pathologies humaines comme la maladie de Huntington, la maladie de Parkinson, les tumeurs cérébrales et le syndrome de l'X fragile ont été modélisées chez la drosophile ou la souris, permettant d'identifier par RMN des composés marqueurs de maladies et les voies métaboliques impliquées.

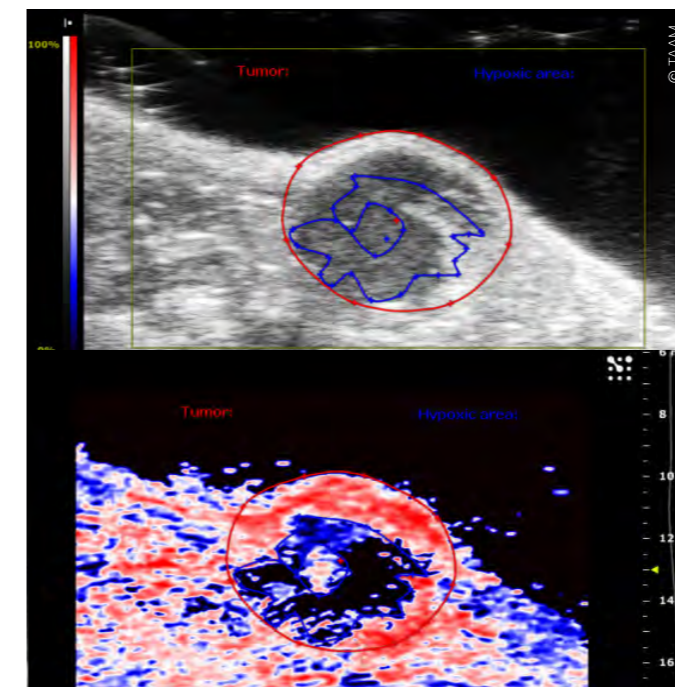
## DÉCRYPTER LES PROCESSUS BIOLOGIQUES

L'imagerie cellulaire, allant de l'étude des tissus à celle des cellules et de leur contenu, est aussi essentielle pour la recherche biomédicale. C'est là que les outils de la sous-plateforme P@CYFIC prennent tout leur sens : cytomètre en flux, trieur de cellules, vidéomicroscopes et microscope confocal. Grâce à ces équipements, les laboratoires réalisent des études variées : détermination de phénotypes cellulaires, quantification de marqueurs, tri cellulaire, dynamique cellulaire et moléculaire, interactions cellulaires. Par exemple, la cytométrie en flux est utilisée en collaboration avec le CHU d'Orléans pour étudier l'inflammation chronique et d'autres maladies (SIDA, sclérose en plaques). Avec l'imagerie cellulaire, les scientifiques caractérisent les modèles de pathologies *in vitro*, comme les interactions cellulaires dans des modèles de mélanome et d'épiderme humain. Ces techniques sont cruciales pour les études *in vitro* avant de passer aux études *in vivo* sur des modèles animaux. Elles sont également essentielles pour les analyses cliniques.

" une compréhension détaillée des processus biologiques "

## DE L'IMAGERIE ANIMALE À LA COMPRÉHENSION DES MALADIES HUMAINES

L'imagerie *in vivo* du petit animal, aussi appelée imagerie préclinique, offre une vision macroscopique des processus biologiques dans un organe. Elle utilise des outils non invasifs sur des modèles



Imagerie de l'hypoxie dans un modèle de cancer mammaire MDA MB 231. Echographique (en haut) et photo-acoustique (en bas). Le contour de la tumeur est délimité par un cercle rouge. La zone hypoxique est entourée en bleu au cœur de la tumeur.

animaux pour comprendre les mécanismes sous-jacents de maladies humaines. Elle participe également au développement de nouvelles thérapies en permettant notamment d'évaluer leur efficacité.

La plateforme MO<sup>2</sup>VING propose l'exploration fonctionnelle et anatomique d'animaux tels que le lapin, le rat, la souris ou encore des insectes grâce à différentes modalités d'imagerie : imagerie et spectroscopie par résonance magnétique (IRM et SRM), tomodensitométrie X, échographie, imagerie radioisotopique (SPECT-CT), optique (bioluminescence) et photoacoustique. Ces techniques ont l'avantage unique de suivre un même animal avec plusieurs acquisitions au cours du temps (suivi longitudinal). De plus, avec ces techniques, les scientifiques visualisent la structure, la fonction et la dynamique des organes et des tissus à différentes échelles, offrant ainsi une compréhension détaillée des processus biologiques.

## UNE SYNERGIE DE TECHNIQUES MULTIMODALES ET MULTI-ÉCHELLES

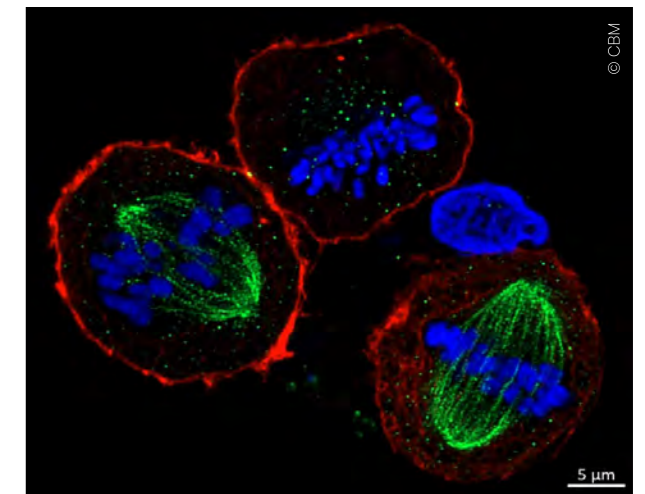
MO<sup>2</sup>VING offre une approche intégrative et synergique pour étudier les processus biologiques à différentes échelles, de la molécule au petit animal. L'association de ces multiples techniques se révèle être efficace pour mieux comprendre certaines maladies. Parmi toutes les pathologies, MO<sup>2</sup>VING est aussi impliquée dans l'étude de l'origine de la résistance des cellules aux traitements antitumoraux en utilisant conjointement l'imagerie photoacoustique et l'IRM pour étudier l'hypoxie (déficit en oxygène), principale cause de radio- et chimiorésistance des cellules cancéreuses. Récemment, dans un modèle de cancer du cerveau chez la drosophile, l'association entre la RMN et l'IRM a mis en évidence qu'une surexpression de récepteurs et d'une enzyme dans des cellules du système nerveux central induit une hypertrophie du cerveau, une cachexie (fonte du tissu adipeux et des muscles) et des perturbations métaboliques. Cette mise en évidence, en grande partie due aux outils et scientifiques de la plateforme MO<sup>2</sup>VING a ainsi permis l'identification de nouvelles cibles thérapeutiques.

Guillaume GABANT - CBM  
guillaume.gabant@cnrs-orleans.fr

Karine LOTH - CBM  
karine.loth@cnrs-orleans.fr

Marylène BERTRAND - CBM  
marylène.bertrand@cnrs-orleans.fr

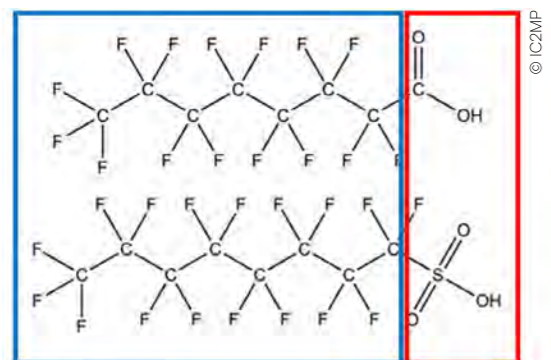
<http://cbm.cnrs-orleans.fr/plateforme-mo2ving/>



Observation par microscopie confocale de cellules d'ostéosarcomes U2OS en phase de mitose.

# PFAS : faire et défaire, c'est toujours de la chimie

Pour les chimistes ce sont des poly- et per- fluoro alkyles. Le grand public les connaît mieux, lui, sous le nom de PFAS. Mais surtout, on les nomme dorénavant " polluants éternels " depuis qu'on les retrouve dans les sols, les eaux, les aliments, mais aussi dans le sang des humains et dans le lait maternel.



Squelette hydrophobe tête hydrophile

Structure chimique des PFAS.

Face aux dangers potentiels qu'ils présentent pour la santé humaine, des normes de plus en plus strictes sur leur concentration dans l'environnement sont notamment édictées en France, en Europe et aux États-Unis.

En raison de leurs structures particulières que les experts appellent "chaînes alkyles poly- ou per- fluorées hydrophobes avec groupe terminal acide sulfonique ou acide carboxylique hydrophile", les PFAS possèdent des propriétés physicochimiques exceptionnelles qui expliquent leur utilisation depuis plus de soixante-dix ans dans de nombreuses applications quotidiennes : pesticides, tensioactifs, lubrifiants, textiles, mousses anti-incendie, produits ignifuges, antiadhésifs, cosmétique, pharmaceutique, énergie (piles à combustible et batteries), etc. Ce qui confère à ces molécules autant de "qualités", c'est la grande stabilité des liaisons entre les atomes de carbone et les atomes de fluor qui composent leur squelette. Mais c'est aussi cette liaison extrêmement difficile à casser entre ces atomes qui confère aux PFAS leur résistance à la dégradation.

Or, même présents en faibles quantités, ils sont suspectés de présenter de forts risques pour la santé humaine. Et comme un malheur n'arrive jamais seul... il n'existe pas un seul PFAS mais des millions de molécules PFAS qui ont pour la plupart une forte solu-

bilité dans les eaux et gagnent donc les différents compartiments de l'environnement aquatique. Leur détection dans les eaux et les sols est donc devenue une préoccupation environnementale pressante, entraînant le renforcement des réglementations sur la qualité de l'eau. Au-delà des problèmes de la contamination des ressources en eau et des procédés de traitement par rétention (charbon actif, résine échangeuses d'ions, membrane osmose inverse, etc.), les procédés de dégradation sont peu nombreux. Outre l'incinération, l'électro-oxydation catalytique, qui permet de dépolluer à basse température, est l'un de ces procédés qui a vu le jour au niveau de quelques applications industrielles, mais qui nécessite encore de la recherche et du développement pour optimiser ses performances. Les chercheurs de l'Institut de Chimie des Milieux et Matériaux de Poitiers (IC2MP, UMR7285 CNRS/Université de Poitiers) travaillent activement sur les aspects de concentration des PFAS par rétention, pour obtenir ensuite une meilleure efficacité de dégradation par électrooxydation catalytique.

" plusieurs millions de molécules PFAS pourraient exister dans l'environnement "

## DÉTECTER ET QUANTIFIER DES PFAS

Les nombreuses mesures effectuées en Europe, en Australie, aux États-Unis, en Chine, etc., ont montré que les taux de contamination des eaux souterraines et de surface par les PFAS variaient de quelques nanogrammes à quelques milliers de nanogrammes par litre. Ils peuvent évoluer en fonction de l'origine et de la nature de la contamination (aéroports, sites d'entraînement pompier, stations d'épuration, agriculture, etc.), et de l'éloignement ou de la proximité de complexes industriels. Selon la littérature scientifique, plusieurs millions de molécules PFAS pourraient exister dans l'environnement. Toutefois, bien que les méthodes analytiques soient en constant développement, seulement une centaine de ce type de molécules peut être analysée/quantifiée par les méthodes classiques normalisées. La grande majorité, n'est pas prise en compte en raison des limites associées aux techniques analytiques utilisées et de l'absence d'étalon. À cause de cette limitation analy-



Traitement de l'eau par rétention.

tique, la réglementation ne porte que sur un faible nombre de molécules (pour les eaux destinées à la consommation humaine, la somme de 20 PFAS identifiés doit être inférieure à 0,10 µg/L) alors qu'il est parfaitement connu que la contamination environnementale par les PFAS fait référence à une très grande diversité de composés. Le recours à la spectrométrie de masse à très haute résolution basée sur la mesure du défaut de masse spécifique au fluor <sup>19</sup>F pourrait permettre d'identifier un grand nombre de PFAS et leurs précurseurs et produits de dégradation aujourd'hui incon-

## UNE FILIÈRE DE TRAITEMENT D'EAU CONTAMINÉE

Les difficultés rencontrées pour traiter les eaux contaminées au niveau industriel sont également problématiques et à nouveau liées à la grande stabilité de ces molécules fluorées. Contrairement à d'autres molécules comme les acides gras qui s'altèrent dans le temps, les composés poly- et per-fluorés, eux, conservent durablement leur structure chimique et persistent. Des technologies développées aujourd'hui permettent tout de même de décontaminer les eaux par adsorption et/ou échange d'ions sur divers matériaux, avec cependant une efficacité réduite pour les PFAS de faible masse moléculaire, ou par rejection (séparation) avec des membranes denses (non poreuses, osmose inverse).

Dans tous les cas, les PFAS à longue chaîne c'est-à-dire avec 8 à 10 atomes de carbone sont mieux éliminés que ceux à courte chaîne avec 3 ou 4 atomes de carbone. Et c'est l'acide trifluoroacétique (TFA) avec 2 atomes de carbone qui est particulièrement scruté par le monde de l'eau (chercheurs, industriels). Mais, ces technologies, qui peuvent être combinées (plusieurs colonnes de charbon actif en série, plusieurs étages membranaires), ne font que déplacer le problème en générant des milieux (solide ou liquide) enrichis en PFAS, dont la principale voie de destruction est aujourd'hui l'incinération, efficace dans certaines conditions de température.

## DÉGRADATION/REMÉDIATION

Différentes stratégies sont étudiées pour la remédiation des PFAS : décomposition photochimique, ultrasonication, oxydation par les sulfates assistée par la température, plasmalyse, électrooxydation catalytique, etc. La plupart de ces méthodes impliquent la formation de radicaux, espèces très réactives, qui participent à la

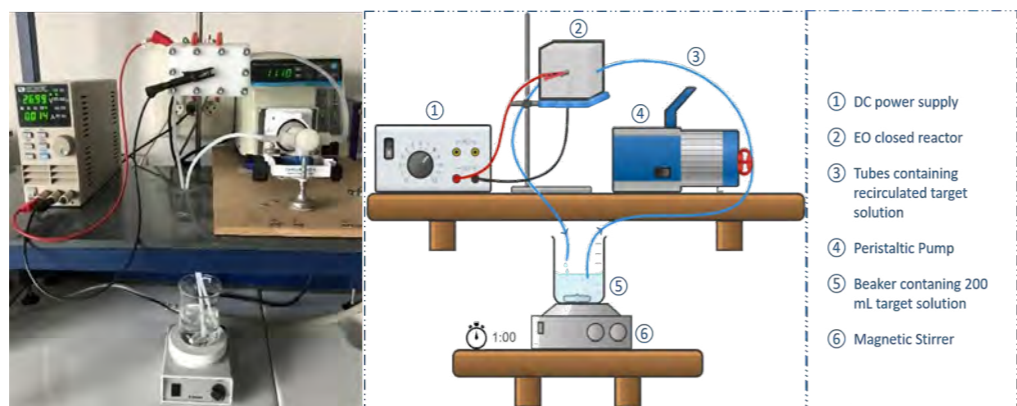
dégradation des PFAS. À l'IC2MP, l'électrooxydation catalytique est un des procédés étudiés, lequel attire les industriels du traitement de l'eau pour des raisons de coûts, de mise à l'échelle et d'efficacité. Le mécanisme est complexe et doit impliquer nécessairement deux chemins réactionnels simultanés et répétitifs pour obtenir la plus grande efficacité de remédiation : l'élimination des fonctions acides hydrophiles de bout de chaîne et la formation d'entités oxydantes puissantes (radicaux OH<sup>•</sup>) qui participent à la destruction du reste de la molécule en ion fluorure F<sup>-</sup> et en CO<sub>2</sub>.

Une première problématique concerne la très faible concentration des PFAS dans les eaux, qui engendre des limitations de cinétique de dégradation par leur diffusion vers l'électrode (transport de matière). Dans ce cas, le couplage avec la filtration par osmose inverse ou l'adsorption sur matériaux poreux sera une étape bénéfique en permettant la production d'une solution concentrée. Dans cette recherche de réponse aux pollutions aux PFAS, les scientifiques veulent également s'assurer que les sous-produits issus de dégradation de ces composés fluorés ne se révèlent pas être eux-mêmes des polluants éternels.

Cela nécessite de nouveau la mise au point de méthodes analytiques de haute performance pour détecter et quantifier les produits de réaction à des concentrations très faibles afin de s'assurer que de plus petits fragments poly-/per- fluorés (composés à courte chaîne), dont les impacts environnementaux ou sanitaires pourraient être pires que ceux des précurseurs, ne soient pas formés.

Christophe COUTANCEAU - IC2MP  
christophe.coutanceau@univ-poitiers.fr  
Jean-Philippe CROUÉ - IC2MP  
jean.philippe.croue@univ-poitiers.fr  
<https://ic2mp.labo.univ-poitiers.fr/>

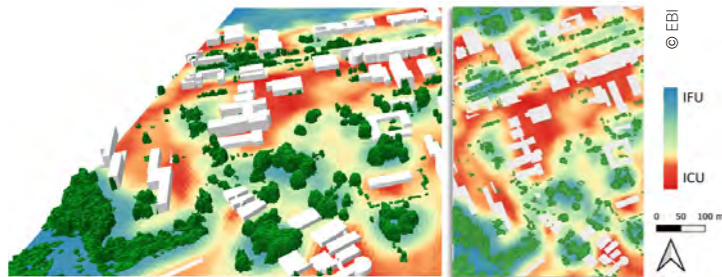
\* Le CNRS a récemment organisé un colloque "PFAS : enjeux et alternatives" consacré aux défis de leur détection, de leur remédiation et de leur remplacement : <https://miti.cnrs.fr/evnement-scientifique/colloque-pfas-enjeux-et-alternatives/>



Procédé d'électrooxydation des PFAS développé à l'IC2MP.

# Ilot de chaleur urbain : le sujet chaud de la ville de demain

Les villes s'étalent et se densifient, souvent au détriment des espaces verts, entraînant un phénomène d'îlots de chaleur urbains qui rend de plus en plus difficile la vie des citoyens. Leur étude sur l'aire urbaine de Grand Poitiers apportera des éléments pour améliorer la vie en ville et réintégrer progressivement la biodiversité en milieu urbain.



Cartographie des îlots de chaleur et de fraîcheur en trois dimensions (à gauche) et en deux dimensions (à droite).

Parmi les principales conséquences des changements climatiques, on distingue des périodes de chaleur de plus en plus longues, fréquentes et intenses. Couplées à une modification de l'usage des sols en faveur de l'artificialisation, ces périodes créent, dans les villes, des zones où la température peut atteindre jusqu'à 10°C de plus par rapport aux zones rurales avoisinantes : c'est ce que l'on appelle les îlots de chaleur urbains (ICU). Ce phénomène s'explique par la disparition des surfaces végétalisées et des espaces de nature en ville et par l'utilisation de matériaux de constructions pouvant favoriser l'accumulation de chaleur en journée. Cette chaleur accumulée le jour est rediffusée la nuit, ce qui empêche l'environnement de se refroidir et crée un potentiel stress chronique chez les organismes vivants, incluant l'Homme. En effet, plusieurs études ont mis en relief les effets délétères des fortes chaleurs sur la santé humaine. Pour ce qui est de la biodiversité, certaines espèces présentes dans nos villes, araignées et oiseaux par exemples, adoptent des comportements différents, comme une reproduction plus précoce dans le temps.

## LES ICU AU CŒUR DES PRÉOCCUPATIONS

L'étalement ou la densification des villes est un phénomène qui s'est dynamisé, pour répondre à une demande constante des usagers et une population humaine croissante. À titre d'exemple, les estimations des chercheurs cartographes du laboratoire Écologie et Biologie des Interactions (EBI, UMR 7267 CNRS/Université de Poitiers) montrent une augmentation des surfaces artificialisées de 48 % entre 1993 et 2017 sur la ville de Poitiers.

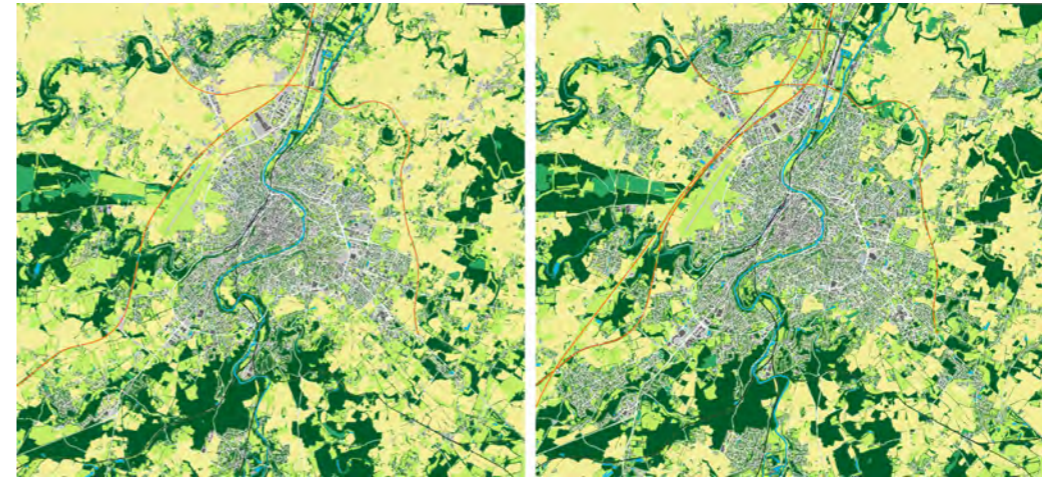
Alors que les ICU ont longtemps été ignorés dans les plans d'aménagements territoriaux, leur augmentation au regard du changement d'utilisation des sols les place au cœur des préoccupations d'aménagement des territoires. En ce sens, les ICU représentent aujourd'hui des zones à réaménager mais aussi des zones sentinelles du réchauffement climatique car la différence de température enregistrée au sein des ICU est équivalente aux températures attendues d'ici à 2050 par certains scénarios du GIEC (groupe intergouvernemental d'experts pour le climat). Ainsi, la caractérisation et la localisation précise des ICU reste une étape cruciale dans l'aménagement des villes de demain.



Capteur enregistrant, en temps réel, les températures et l'hygrométrie des zones équipées.

## UN JEU DE CARTES

Grâce à des outils cartographiques, les chercheurs d'EBI ont rapatrié et compilé les bases de données institutionnelles afin de décrire avec précision l'occupation du sol de l'aire urbaine de Grand Poitiers. Cependant, la végétation urbaine étant souvent sous-estimée dans les bases de données institutionnelles, cette cartographie d'occupation du sol a été enrichie avec la végétation arborée et herbacée télédétectée à l'aide d'outils et de méthodes développées au laboratoire EBI. En effet, dans un contexte d'ICU, la végétation est importante à prendre en compte car elle va fournir une évapotranspiration et des ombres portées capables d'abaisser localement les températures. Ce travail a permis de construire des cartes d'occupation du sol en 1993 et aujourd'hui afin de pouvoir estimer l'évolution spatio-temporelle des ICU. Ces cartes d'occupation du sol ont été implémentées dans le logiciel InVest, afin d'obtenir un indice d'atténuation de la chaleur (HMI). Au-delà de la simple occupation du sol, cet indice tient compte



1993

2017

Evolution spatio-temporelle du paysage de Poitiers et ses alentours entre 1993 et 2017. Cette figure illustre l'étalement urbain (en gris) au détriment des surfaces végétalisées (en nuances de vert).

également de données biophysiques dérivées des cartes telles que l'albédo (pouvoir réfléchissant d'une surface), l'évapotranspiration (évaporation au niveau des sols et transpiration des plantes), les indices de végétation et de culture ou encore la densité du bâti. Les résultats obtenus ont été affinés avec des données de températures enregistrées par les satellites de la mission LANDSAT et vérifiés par l'installation de 50 capteurs qui enregistrent, en temps réel, les températures et l'hygrométrie des zones équipées. Les résultats confirment que les ICU et inversement les îlots de fraîcheur suivent une logique d'occupation du sol qui leur est propre avec des zones de chaleur souvent associées à une forte urbanisation et à une absence de végétation.

## " le retour de la biodiversité en paysage urbain "

### DES CARTES AUX SOLUTIONS

Dans un but de favoriser et améliorer la vie en ville, les cartographies et particulièrement la caractérisation et la localisation des îlots de chaleur et de fraîcheur réalisées par le laboratoire EBI intégreront le prochain plan local d'urbanisme (PLU). Comme attendu et à la lueur des résultats obtenus, l'une des solutions pour lutter contre ces phénomènes d'ICU serait un retour de la nature en ville sous forme d'arbres notamment. Ceux-ci lutteraient ainsi contre l'augmentation locale des températures et favoriseraient aussi le retour de la biodiversité en paysage urbain. En effet, des inventaires de biodiversité, menés dans le cadre de ce projet, ont révélé qu'elle était moins riche au sein des zones de chaleur que dans les alentours.

Au-delà de ces inventaires de biodiversité, menés en collaboration avec les associations naturalistes Vienne Nature et la Ligue pour la Protection des Oiseaux, les travaux ont également pour vocation d'estimer le stress occasionné chez les organismes contraints de rester au sein des ICU. Pour cela, les biologistes se concentrent actuellement sur des organismes connus pour être indicateurs de la qualité des milieux : les cloportes. En effet, bien connu du laboratoire EBI, ce crustacé terrestre est un modèle de choix, dans le

cadre de ce projet, car il est sensible aux variations de températures et d'humidité. Ainsi, les scientifiques d'EBI compareront l'état de santé physiologique entre cloportes prélevés en ICU et cloportes prélevés en îlots de fraîcheur urbain.

Puis à l'aide d'une expérience menée en laboratoire en conditions contrôlées dans des enceintes climatiques, ils évalueront l'effet des conditions du réchauffement climatique prédites par les scénarii du GIEC sur les descendants des animaux prélevés sur le terrain, en analysant leur état de santé physiologique et leurs traits d'histoire de vie (croissance, reproduction, survie). Cela permettra d'estimer les capacités d'adaptation et de résilience de ces organismes du sol, véritables décomposeurs indispensables au fonctionnement de l'écosystème. Les résultats devraient apporter des réponses quant aux conséquences des stress thermiques rencontrés au sein des îlots de chaleur urbains, certes sur ces cloportes, mais aussi par extension, sur les êtres vivants de l'écosystème.

Axel JAME - EBI  
axel.jame@univ-poitiers.fr

Nicolas BECH - EBI  
nicolas.bech@univ-poitiers.fr

Sophie BELTRAN-BECH - EBI  
sophie.beltran.bech@univ-poitiers.fr

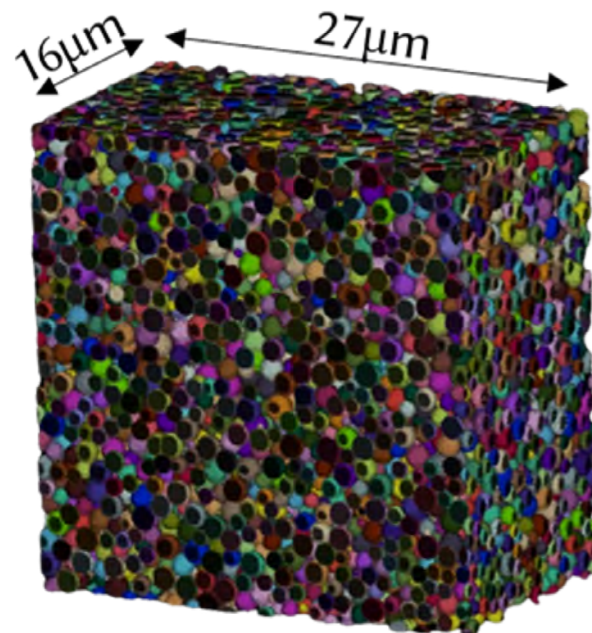
Hélène PAULHAC - EBI  
helene.paulhac@univ-poitiers.fr

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

Ce projet est financé par la Région Nouvelle Aquitaine, l'Office français de la biodiversité et l'université de Poitiers et bénéficie d'un riche consortium composé d'EBI, du laboratoire RURALITES (université de Poitiers), de la start-up Pictamap (issue du laboratoire EBI) et de Grand Poitiers Communauté Urbaine.

# Les microstructures céramiques à la loupe grâce à l'intelligence artificielle

Les céramiques ont fait leur apparition dès le néolithique, 10 000 ans avant notre ère. Elles sont toujours un matériau très utilisé dans des procédés innovants. Leurs microstructures sont dorénavant explorées par l'IA.



© IRCER

Image d'une microstructure 3D segmentée par stardist.

Des travaux de recherche collaboratifs\* entre l'Institut de Recherche sur les Céramiques (IRCER, UMR 7315 CNRS/Université de Limoges) et le CEA Le Ripault, visent à modéliser par la Méthode dite des Éléments Discrets (MED) le comportement thermique des pièces céramiques. Cette modélisation est mise en œuvre à l'aide du code de calcul opensource GranOO co-développé par les numériciens de l'IRCER. Elle devra permettre, in fine, d'optimiser les conditions des procédés de fabrication des céramiques.

En effet, le CEA Le Ripault développe des procédés innovants de mise en forme de pièces céramiques par fabrication additive (ajout de matière en couches successives). Il s'est focalisé plus spécialement dans la réalisation par micro-stéréolithographie 3D de structures ultra-poreuses envisagées comme isolants thermiques à haute température que l'on retrouve dans le domaine de l'aérospatial. Ce procédé repose sur la photopolymérisation d'une résine chargée en particules micrométriques céramiques au moyen d'un faisceau laser.

Une fois la pièce imprimée en 3D, celle-ci subit un premier traitement thermique à moyenne température (de l'ordre de 800°C) afin d'éliminer la résine organique. À ce stade, la pièce céramique est extrêmement fragile. Puis la pièce subit un deuxième traitement thermique à plus haute température (à partir de 1250°C) afin de la consolider par frittage (procédé de fabrication consistant à chauf-

fer une poudre sans la mener jusqu'à la fusion). La microstructure de la pièce finale dépend des paramètres du cycle thermique de frittage comme la température, la vitesse de chauffage et la durée des paliers. Ainsi, afin d'optimiser la microstructure de la pièce céramique et donc ses propriétés thermiques et mécaniques, il est nécessaire de bien maîtriser ces paramètres en prenant en compte leur impact sur le processus de consolidation des pièces.

C'est là qu'intervient l'IRCER pour développer un modèle MED. La particularité de la MED est de s'intéresser aux interactions entre les particules céramiques. Une modélisation MED demande de connaître la taille et la position de chacune des particules céramiques. Dans cet objectif, une méthodologie originale de reconstruction 3D de la microstructure céramique, à partir d'observations expérimentales aux échelles les plus fines, c'est-à-dire à l'échelle de la particule élémentaire ou du pont solide formé entre ces particules a été développée.

## MÉTHODOLOGIE EXPÉRIMENTALE DE RECONSTRUCTION 3D

Dans une première approche, la méthodologie de reconstruction 3D a été prototypée sur des pastilles de 8mm de diamètre, élaborées par pressage uniaxial. Une poudre dite "modèle" de particules de silice quasi sphériques de diamètre avoisinant le micromètre a été retenue. À ce stade, ces pastilles sont dites "crues", car elles n'ont subi aucun traitement thermique.

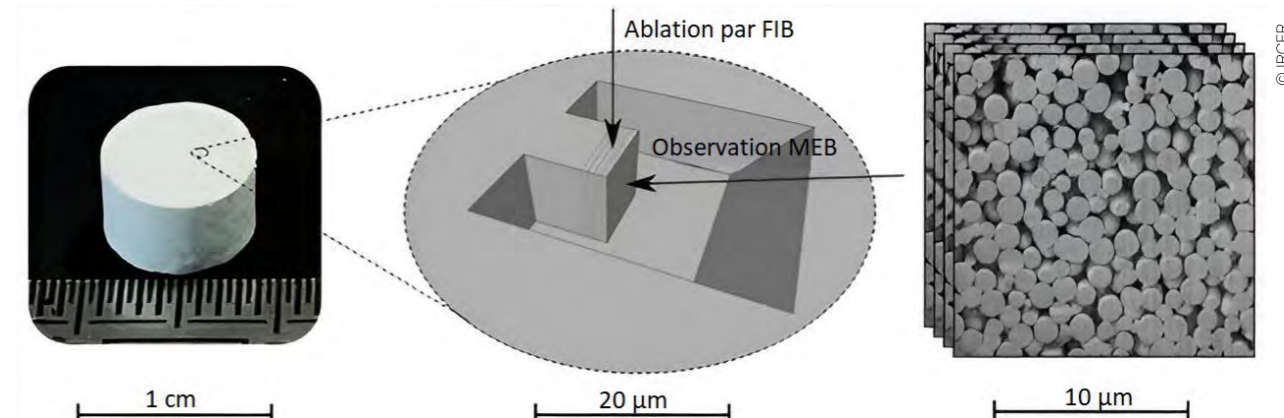
Après découpe, les pastilles ont été observées à l'aide d'un Microscope Électronique à Balayage (MEB) équipé d'une Sonde Ionique Focalisée (FIB). Le MEB permet de réaliser des images de haute définition avec une résolution de l'ordre d'une dizaine de nanomètres tandis que le FIB permet l'érosion en direct de la matière.

" l'algorithm met seulement quelques minutes à identifier quelques milliers de particules "

Avec ce procédé, il est possible de réaliser une série de clichés en alternant une phase de découpe et une phase d'acquisition d'images. En prenant en compte le temps nécessaire à l'ajustement des paramètres de la machine, la préparation in situ de l'échantillon et l'acquisition en elle-même, 24 heures sont nécessaires pour caractériser un volume cubique de 10µm de côté. En combinant la série d'images 2D, il est alors possible de réaliser une reconstruction 3D de la microstructure en appliquant préalablement une série de traitements numériques pour éliminer un certain nombre d'artefacts présents sur les images.

## SEGMENTATION DE LA MICROSTRUCTURE

L'objectif de cette étape numérique de segmentation est d'identifier chacune des particules. Elle est rendue difficile par la présence de porosité. En effet, les techniques "classiques" de segmentation ne permettent pas de discriminer une particule dans le plan de



Méthodologie expérimentale de caractérisation : à gauche, pastille céramique ; au milieu, vue schématique du MEB-FIB ; à droite, images finales obtenues.

coupe d'une particule qui se trouve en arrière de celui-ci. Il en résulte alors une surdétermination des particules.

Afin de résoudre ce problème, il est possible d'utiliser des outils de segmentation intelligents basés sur des algorithmes à apprentissage. Le modèle grand public "segment anything", développé par Meta en 2023, a été testé. Bien que donnant des résultats intéressants sur des images standards 2D, il s'est avéré très difficile d'adapter cet algorithme dans un contexte 3D.

Après une phase prospective visant à recenser les algorithmes intelligents de segmentation capables de travailler directement sur des images 3D, le modèle de deep learning "stardist", utilisé dans le domaine du génie biologique pour la reconnaissance de cellules a été retenu. Ce choix a été dicté en raison des similarités morphologiques entre les particules de silice avec les cellules biologiques que "stardist" est capable de segmenter.

La version 3D de stardist n'étant pas préparée pour la silice, il a été nécessaire d'entraîner l'algorithm. Pour cela, un sous-domaine contenant une vingtaine de particules a été extrait de l'image 3D obtenue à l'étape précédente. Ces 20 particules ont toutes été identifiées manuellement en 3 à 4 longues heures afin d'entraîner le modèle "stardist". L'algorithm a été ensuite mis en œuvre pour segmenter l'intégralité de l'image. Là où l'humain aurait mis plus d'une centaine d'heures à réaliser ce travail, l'algorithm met seulement quelques minutes à identifier quelques milliers de particules. La dernière étape consiste finalement à calculer le centre de masse de chacune des particules et à estimer leurs dimensions, permettant ainsi de numériser la microstructure dans un format compatible avec la méthode des éléments discrets.

Cette voie de numérisation mise au point par l'IRCER représente de façon réaliste des microstructures céramiques et ouvre de nouvelles perspectives dans le domaine de la modélisation de ces matériaux. Plus particulièrement, elle permet de mieux appréhender les relations microstructures et propriétés des matériaux céramiques et d'envisager un meilleur contrôle de l'évolution microstructurale lors du traitement thermique d'une pièce céramique.

Les travaux de l'IRCER vont même au-delà de l'application scientifique puisqu'il est même possible de s'immerger complètement dans ces microstructures 3D à l'aide de casques de réalité virtuelle. Cette dernière opportunité a d'ailleurs été exploitée au travers d'un atelier ludique à l'attention d'élèves de lycée.



Immersion dans une microstructure céramique lors d'un atelier ludique à l'attention de lycéens et lycéennes.

Damien ANDRE - IRCER  
Damien.andre@unilim.fr  
Aya BENJIRA - IRCER  
Aya.benjira@unilim.fr  
Pierre CARLES - IRCER  
Pierre.carles@unilim.fr  
<https://www.ircer.fr/>

\* menés dans le cadre du laboratoire de recherche commun ELECTRA



# Le théâtre de John Marston, ou l'audace d'une langue qui s'invente

Si l'on connaît, en France, le théâtre de Shakespeare (1564-1616) —*Hamlet, Macbeth* ou *Roméo et Juliette*—, on connaît moins celui de son contemporain John Marston (1576-1634), dont une seule pièce, *Le Malcontent*, est à ce jour traduite en français. Or l'héritage théâtral que nous laisse Marston mérite l'attention, en raison de sa force dramaturgique, mais aussi de son étonnante inventivité linguistique.



La Cathédrale Saint Paul vue de la Tamise pendant le règne d'Élisabeth I (détail). Gravure de Wenceslaus Hollar, 1647

Au tournant des XVI<sup>e</sup> et XVII<sup>e</sup> siècles, dans l'Angleterre de la reine Élisabeth I, le théâtre est en plein essor. Les dramaturges se saluent ou s'invectivent par pièces interposées ; les troupes d'enfants rivalisent avec les troupes d'adultes ; les spectateurs viennent voir du spectaculaire, mais aussi écouter une langue qui ne cesse de s'enrichir.

Malgré ses études de droit à Oxford, Marston n'a nulle intention de devenir juriste comme son père. Il aime l'écriture littéraire et il la pratique, sur les traces d'Ovide et de Juvénal, avec un goût particulier pour la satire, ce qui semble en accord avec sa nature querelleuse notoire. En 1599, ses deux recueils satiriques sont condamnés au bûcher. La même année, son père, qui digère mal les activités "frivoles" de son fils, lui coupe les vivres. Marston est alors heureux d'accepter l'emploi que lui propose le directeur de théâtre Philip Henslowe : il se met à écrire pour la troupe d'enfants "The Children of Paul's" et met en scène, dans le cloître de la cathédrale Saint Paul à Londres, sa tragicomédie *Antonio and Mellida*, suivie de la tragédie sanglante *Antonio's Revenge*. Il a vingt-quatre ans à peine.

" sa verve satirique n'a d'égal que son inventivité linguistique "

## ANTONIO AND MELLIDA (1599) ET ANTONIO'S REVENGE (1600)

Dans ces deux pièces qui forment un diptyque, Marston revisite le stoïcisme et la tragédie de la vengeance dont il est l'héritier ; il s'essaie à des hybridations génériques, stylistiques et linguistiques ; il explore les capacités scénographiques inédites du cloître de la cathédrale londonienne. Il crée de nombreux échos intertextuels, avec le théâtre de Sénèque (*Thyeste, Agamemnon, Médée*), mais aussi avec celui de Thomas Ky (*The Spanish Tragedy*) et de Shakespeare (*Romeo and Juliet, Hamlet, Richard III, Titus Andronicus*) ; il fait des allusions aux écrits d'Érasme

et de Montaigne. Il s'inspire de la dynastie des Sforza, qui naît dans l'Italie du XV<sup>e</sup> siècle, pour nourrir sa réflexion politique sur la tyrannie. Il contribue activement à la "Guerre des Théâtres", qui fait rage à Londres au tournant du siècle.

Il faut dire que sa verve satirique n'a d'égal que son inventivité linguistique. Marston malmène la syntaxe, recourt tantôt aux vers rimés tantôt à une prose alambiquée, se délecte de néologismes en tous genres, fait surgir des citations latines et des dialogues en italien (sa mère était originaire d'Italie). Il s'amuse à surprendre son audience dans un contexte où la rivalité entre dramaturges, troupes et théâtres est à son comble. Mais il y a là plus qu'un effet de surprise qui serait simplement rhétorique et pragmatique : Marston est fasciné par l'infinie variété de l'expression verbale :

## THE HISTORY OF Antonio and Mellida,

*The first part.*

*As it hath beene sundry times acted, by the children of Pauls.*

Written by I. M.



LONDON  
Printed for Mathewe Lownes, and Thomas Fisher, and are to be soulede in Saint Dunstons Church-yard.  
1602.

Première de couverture  
Early English Books Online, Copyright 2019 ProQuest LLC  
Images reproduced by courtesy of Folger Shakespeare Library

¶ Enter Castilio, Forobosco.  
Antonio, Forobosco, Alberto, Feliche, Castilio, Balurdo? run, keepe the Palace, post to the ports, goe to my daughters chamber : whether now? scud to the Lewes, stay, runne to the gates, stop the gundolets, let none passe the marsh, doe all at once. Antonio? his head, his head. Keep you the Court, the rest stand still, or runne, or goe, or shoute, or searsh, or scud, or call, or hang, or doe doe doe, su su su, something : I know not who who who, what I do do do, nor who who who, where I am.  
O trista traditriche, rea yibalda fortuna,  
Negando mi vindetta mi causa fera morte.  
Fel. Ha ha ha. I could breake my splene at his impatience.

Extrait de Antonio and Mellida, Acte II  
EEBO, Copyright 2019 ProQuest LLC  
Images reproduced by courtesy of Folger Shakespeare Library

pour lui, toute création langagière ou importation étrangère contribue à enrichir la langue anglaise. L'*Oxford English Dictionary* continue de recenser les nombreuses "premières occurrences" ou "uniques occurrences" de termes que l'on lui doit.

## ÉLASTICITÉ LINGUISTIQUE, PORTÉE PARODIQUE

Si Marston se livre à de surprenantes créations lexicales et à d'étranges agencements syntaxiques, il tend à les mettre dans la bouche de personnages dont il se moque.

Dans *Antonio et Mellida* par exemple, Piero en proie à la panique (il lui faut retrouver les fuyards, Antonio et sa fille) éructe une suite d'injonctions qui se déploient et se replient par un effet de chiasme, ce qui accentue l'impression de tourner à vide, un paradoxe ironique puisque Piero n'emploie que des verbes d'action :

Fly, call, run, row, ride, cry, shout, hurry, haste,  
Haste, hurry, shout, cry, ride, row, run, call, fly  
Backward and forward, every way about !

Volez, alertez, courez, ramez, chevauchez, criez, hurlez,  
hâtez-vous, dépêchez-vous.  
Dépêchez-vous, hâtez-vous, hurlez, criez, chevauchez, ramez,  
courez, alertez, volez  
Par ici et par là, dans toutes les directions !  
(III, 2, 271-273 ; ma traduction).

Tout se passe comme si l'énoncé performatif s'autodétruisait par son excès même.

Marston s'amuse aussi du bégaiement, cette "langue étrangère dans la langue" comme le dira plus tard Gilles Deleuze, de son personnage. Submergé par la surprise et la colère (Antonio et sa fille lui échappent), Piero ne parvient plus à dire :

[À Felice] Gardez la cour. Les autres, ne bougez pas, ou courez, ou partez, ou criez, ou cherchez, ou hâtez-vous, ou appelez, ou attendez, ou faites... faites... faites... quel... quel... quel... quelque chose. Je ne sais pas qui... qui... qui..., ce que je fais... fais... fais..., ni qui... qui... qui..., où je suis.  
(III, 2, 181-185 ; ma traduction)

Ici, le passage brutal des pentamètres iambiques à la prose fait entendre l'effondrement d'une structure langagière symptomatique d'un trouble psychique.

## QUEL DÉFI POUR LE TRADUCTEUR !

Quel défi pour le traducteur que de donner accès à ces pièces dans une autre langue, et à une autre époque, tout en restituant son extraordinaire audace linguistique, notamment ce que James Knowles nomme : "his extravagantly inventive vocabulary" (*Oxford Dictionary of National Biography*) ! Car il faut prendre en compte ses adjectifs nouvellement composés, ses mots valises, ses glissements d'usage du sens propre vers un sens figuré inusuel, son emploi transitif de verbes jusqu'alors intransitifs, ses jeux de paronomase, sans oublier ses nombreux néologismes (ceux qui ne sont pas même attestés dans l'*Oxford English Dictionary* ; ceux qui sont à occurrence unique et que l'on appelle hapax ; ceux qui sont répertoriés comme première occurrence).

Cette langue libre, qui ne se laisse circonscrire ni par les grammaires ni par les dictionnaires, et qui, en cela même, contribue à l'enrichissement de la langue anglaise, demeure une des singularités de ce satiriste-dramaturge aujourd'hui méconnu. Traduire le théâtre de Marston, en tentant de lui rendre sa singulière vigueur, c'est aussi réfléchir à l'évolution de notre propre langue et lui rendre, ne serait-ce que le temps d'une traduction, une élasticité et une créativité que le quotidien tend à gommer.

## OBLIVIONI SACRUM, VRAIMENT ?

L'ironie réside dans le fait que Marston n'aurait peut-être pas aimé que ses pièces soient traduites et jouées aujourd'hui, lui qui s'était retiré du monde du théâtre en 1607 pour entrer dans les ordres, lui qui avait fait graver sur sa pierre tombale : *Oblivioni sacrum\**.

Pascale DROUET - CESCO  
pascale.drouet@univ-poitiers.fr  
<https://cescm.labo.univ-poitiers.fr/>

Cette recherche en cours a donné lieu à deux conférences : l'une à Montpellier, à l'Institut de recherche sur la Renaissance, l'âge Classique et les Lumières (UMR 5186), où le présent auteur est actuellement en délégation CNRS ; l'autre aux États-Unis, au Marco Institute for Medieval and Renaissance Studies, avec lequel le CESCO a récemment signé une convention.

\* sacré jusqu'à l'oubli

## Mai à vélo



Le Challenge national Mai à vélo s'est achevé avec un total de **149 436 km** parcourus par des agents CNRS et en particulier **5 161 km** par des agents du Centre Limousin Poitou Charente.

Lors du challenge conjoint CNRS / Université d'Orléans, les 171 agents participants ont comptabilisé **plus de 26 000 km** (sans toutefois entrer dans le décompte national puisqu'ils ont constitué un regroupement d'établissements).

mai

Toute la circonscription



Entre le 22 avril et le 17 mai, **1,3 tonne de textiles** a été collectée auprès des personnels des unités.

avril - mai

Orléans

## Arrivants



**Le Docteur Safia Pelois** est le nouveau médecin du travail. Elle est assistée de Céline Foucher, infirmière. Pour la contacter : <https://intranet.cnrs.fr/delegations/dr8/agents/medecine/Pages/default.aspx>

**Aurélien Plaisance** a pris ses fonctions de responsable du service Patrimoine et Logistique de la Délégation régionale le 3 juin 2024.

Pour le contacter : <https://intranet.cnrs.fr/delegations/dr8/Pages/Un-nouveau-responsable-Patrimoine-et-Logistique.aspx>



© Linda Jeuffrault - CNRS

## Rechargez vos batteries !



Le Service Patrimoine et Logistique de la Délégation régionale a installé 4 nouvelles bornes de recharge pour véhicules électriques sur le campus. Elles complètent les bornes déjà disponibles depuis plusieurs mois.

Contact : [DR08.liste.spl.logistique@dr8.cnrs.fr](mailto:DR08.liste.spl.logistique@dr8.cnrs.fr)

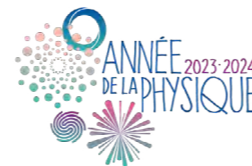
juin

Orléans

## Année de la physique

### 6 journées de formation

pour les enseignants du 2<sup>nd</sup> degré (collège, lycée)



### 150 enseignants participants

sur les sites de Orléans, Poitiers, Limoges et Bourges

### 1 concours vidéo

« Montrez-nous la physique en 180 secondes » avec 5 projets et 30 collégiens impliqués.

mai

Toute la circonscription

## Science, innovation et vulgarisation



Le Service du Partenariat et de la Valorisation de la Recherche à Poitiers a organisé la 2<sup>ème</sup> édition de "Pint of innovation" où des scientifiques de Poitiers ayant participé à la création d'une start-up

pour valoriser leurs résultats de recherche, ont témoigné lors de deux soirées (29 mai et 4 juin) de leurs projets et de leurs parcours d'entrepreneur, dans une ambiance décontractée et conviviale.

mai - juin

Poitiers

## Partenariat



© Linda Jeuffrault - CNRS

Le CNRS et l'Institut National de la Propriété Industrielle ont signé une convention pour organiser leurs relations en faveur du développement économique, du développement de la recherche publique et de l'innovation en Centre Val de Loire.

30 avril

Orléans

## Et les gagnants sont...

Le concours photo "Regard[e] la science" lancé par le service communication de la Délégation régionale a remporté un immense succès avec 81 clichés déposés par les laboratoires.

Le jury, réuni le 25 juin, a décerné le Grand prix du Jury à Alexander Nies du LPC2E avec "Mesures des gaz volcaniques au coucher du soleil" et le prix Coup de Coeur

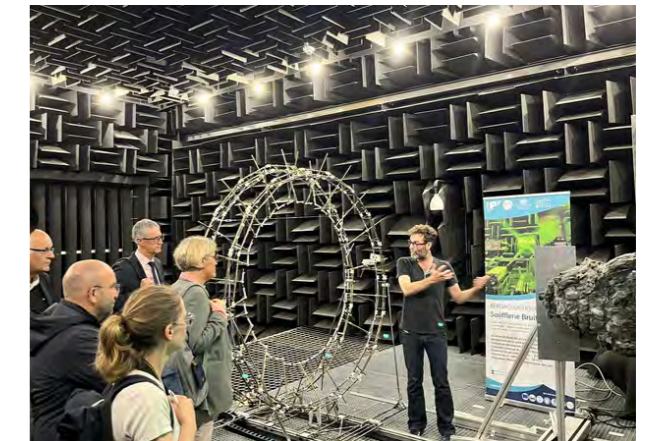


© Alexander Nies - LPC2E

juin

Toute la circonscription

## Inauguration



© Université de Poitiers

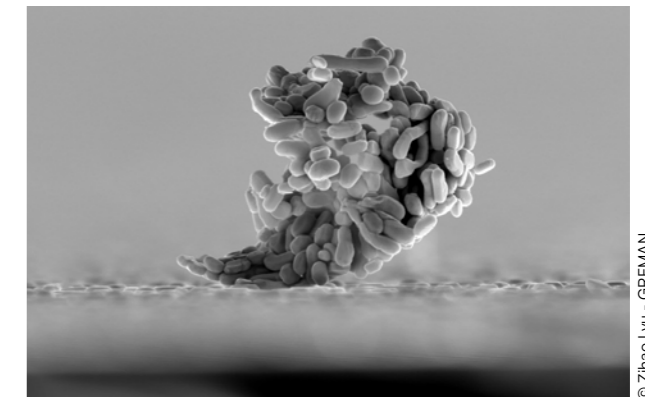
La seconde tranche de la plateforme PROMETEE (pour PROgramme et Moyens d'Essais pour les Transports, l'Energie et l'Environnement) complète les moyens expérimentaux inaugurés en 2018, spécialement dédiés aux recherches en mécanique des fluides, aérodynamique, tribologie et énergétique appliqués à la propulsion aéronautique et spatiale. Elle s'enrichit de moyens d'études sur la combustion, l'aéro-acoustique et les matériaux. La plateforme s'ouvre ainsi à l'étude des matériaux haute pression pour la filière énergétique Hydrogène et l'industrie des étanchéités, ainsi qu'à la sécurité incendie s'appuyant sur l'expertise scientifique des équipes de l'Institut Pprime (CNRS).

18 juin

Poitiers

du Jury à Zihao Lyu du GREMAN avec son cliché "Le pied en or olympique". Le prix du public sera décerné par les visiteurs de la Fête de la Science les 5 et 6 octobre 2024 sur le campus CNRS d'Orléans.

Toutes les photos seront déposées à la photothèque CNRS Images du CNRS.



© Zihao Lyu - GREMAN

## Agenda

### Colloques

#### RonsArt

Colloque-festival international  
66<sup>e</sup> Colloque International d'Études  
Humanistes

<https://ronsart.hypotheses.org/>

10 - 13 sept.

Tours

#### PARAMA Risque naturel

Perception et adaptation au risque naturel  
à l'Antiquité et au Moyen Âge

<https://www.msh-vdl.fr/category/manifestations-scientifiques/>

7 - 8 oct.

Orléans

#### TRIBO PPRIME 23<sup>th</sup>

Partager les connaissances sur les  
systèmes d'étanchéité dans des applica-  
tions d'énergie verte.

<https://tribopprime2024.sciencesconf.org/>

17 oct.

Poitiers

### Manifestations

#### JOURNÉES EUROPÉENNES DU PATRIMOINE



MANIFESTATION - 41<sup>e</sup> édition sur le thème  
" Patrimoine des itinéraires, des réseaux et des  
connexions et Patrimoine maritime "

<https://journeesdupatrimoine.culture.gouv.fr>

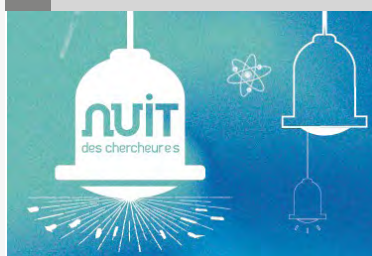
21 - 22 sept

Sur tout le territoire

4 — 14 OCTOBRE 2024



#### NUIT DES CHERCHEURS



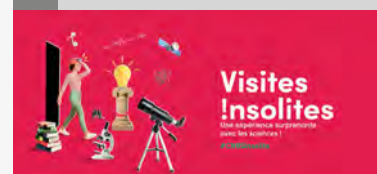
MANIFESTATION - Rencontre conviviale entre  
scientifiques et grand public

<https://www.nuitdeschercheurs-france.eu>

27 sept

Limoges

#### VISITES INSOLITES



MANIFESTATION - Des rendez-vous intimistes,  
interactifs et exceptionnels pour le grand  
public autour d'expériences, dans des lieux  
uniques, avec des échanges privilégiés avec  
les scientifiques.

<https://visitesinsolites.cnrs.fr>

4 - 14 oct.

Sur tout le territoire