

# L'Édition de l'université paris-saclay été 2021

Année

2021

Pays

France

Rubrique et thématique

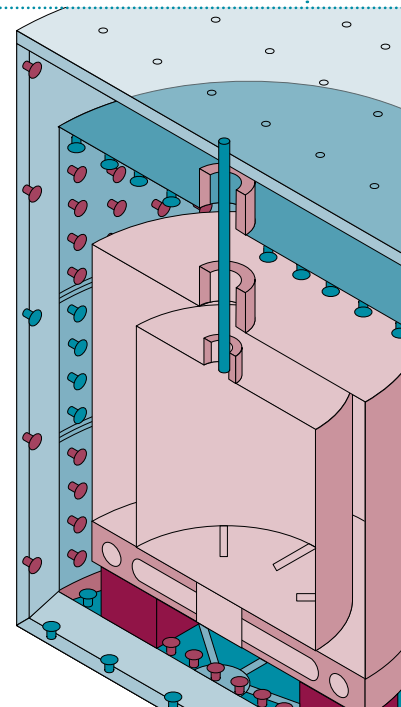
Recherche – Neutrinos

Page

19

Numéro

# 16



Rubrique

Formation

Page

04

Rubrique et thématique

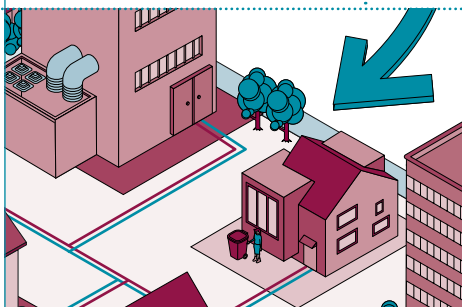
Recherche – Économie circulaire

Page

11

Titre

## L'ENTREPRENEURIAT ÉTUDIANT À L'UNIVERSITÉ PARIS-SACLAY



Rubrique

Médiation des sciences

Page

06

Rubrique et thématique

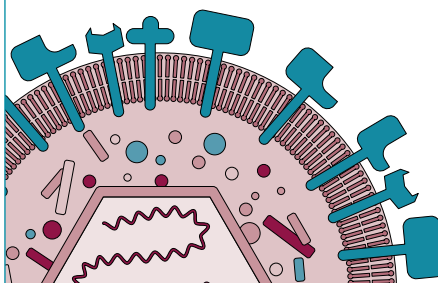
Business & Innovation – Du laboratoire  
à la start-up

Page

14

Titre

## CIEL ET ESPACE: LES SCIENCES DE LA TERRE ET DE L'UNIVERS À L'HONNEUR!



Rubrique

Vue d'ailleurs

Page

23

Titre

## DINNER ON BOARD SPACE STATION: BEEF BURGUNDY OR LOBSTER?

Rubrique et thématique

Recherche – Blockchain

Page

08

Rubrique et thématique

Recherche – Lasers femtosecondes

Page

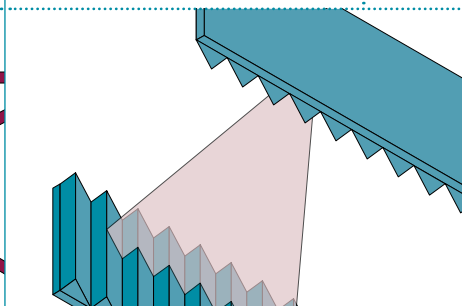
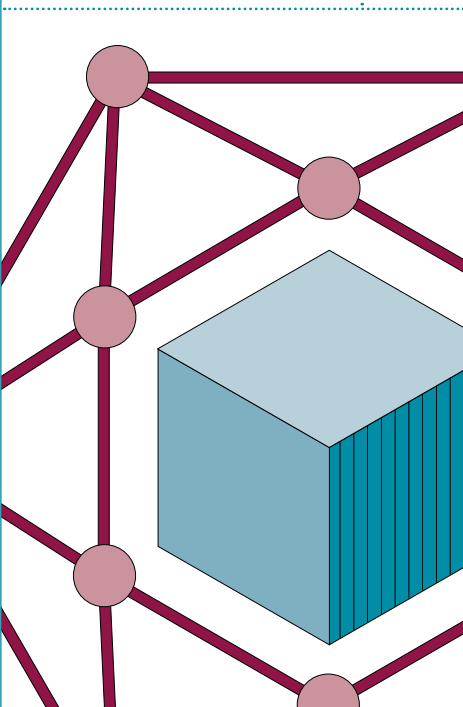
16

Rubrique

Vie de campus

Page

24



Titre

## UN CAMPUS EN HARMONIE AVEC SON MILIEU NATUREL

# université PARIS-SACLAY

Adresse

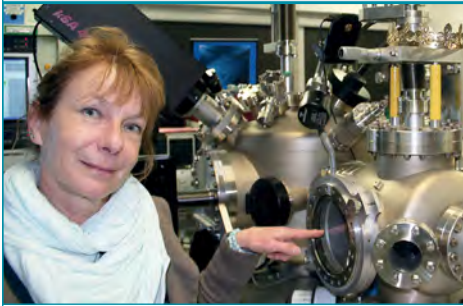
Bâtiment Breguet – 3 rue Joliot-Curie 91190 Gif-sur-Yvette – France

Site internet

[www.universite-paris-saclay.fr](http://www.universite-paris-saclay.fr)



## CHERCHEURS / CHERCHEUSES



© SD/Université Paris-Saclay

**Agnès Barthélémy**, de l'Unité mixte de physique CNRS/Thales (UMPhy – UPSaclay, CNRS, Thales) a été récompensée par l'**IUPAP Magnetism Award and Néel Medal 2021** pour ses travaux sur les matériaux magnétiques et ferroélectriques.

**Bérengère Dubrulle**, du Service de physique de l'état condensé (SPEC – UPSaclay, CEA, CNRS) a reçu la **médaille Lewis Fry Richardson 2021** de l'*European Geosciences Union* (EGU) pour l'ensemble de ses travaux en dynamique des fluides.



© MGP

**Christophe Junot**, chef du Département médicaments et technologies pour la santé (DMTS – UPSaclay, CEA) et du Service de pharmacologie et immunoanalyse (SPI – UPSaclay, CEA, INRAE), a été nommé au grade de **chevalier dans l'ordre national de la Légion d'honneur**. Cette distinction récompense une carrière au service de la bio-détection à des fins thérapeutiques et de diagnostic.

**Julien Lagarde**, neurologue clinicien à l'hôpital Sainte-Anne et chercheur au Laboratoire d'imagerie biomédicale multimodale Paris-Saclay (BioMaps – UPSaclay, CEA, CNRS, Inserm) s'est vu décerner le **prix Joël Ménard** de la Fondation Alzheimer (catégorie Recherche clinique et translationnelle) pour ses travaux sur les mécanismes physiopathologiques des maladies neuro-dégénératives par l'utilisation d'outils d'imagerie moléculaire (TEP).

**Michel Masella** et **Raphaël Guérois** de l'Institut de biologie intégrative de la cellule (I2BC – UPSaclay, CEA, CNRS) (catégorie *Computational Biologics*), et **Nicolas Tournier** du Service Hospitalier Frédéric Joliot (SHFJ – UPSaclay, CEA) (catégorie *Nanobody Explorative Technology*) sont lauréats des **Sanofi iTechAwards 2021**.

**Antoine Strugarek**, du Département d'astrophysique (DAP – UPSaclay, CEA), a reçu le **prix MERAC 2021 du meilleur début de carrière en astrophysique théorique**, décerné par la Société européenne d'astronomie (EAS).

**Bertrand Thirion**, responsable de l'équipe PARIETAL (UPSaclay, Inria, CEA) du département NeuroSpin, directeur de recherche à Inria et directeur de l'Institut DATAIA Paris-Saclay, a été nommé au grade de **chevalier de l'ordre national du Mérite**. Une nomination qui récompense ses recherches en modélisation statistique des fonctions cérébrales à l'aide de données de neuroimagerie.

**Antoine Browaeys**, du Laboratoire Charles Fabry (LCF – UPSaclay, IOGS, CNRS), et **Cathy Clerbaux**, du Laboratoire atmosphères, milieu, observations spatiales (LATMOS – UVSQ, CNRS, Sorbonne Univ.), ont reçu la **médaille d'argent 2021 du CNRS**.

**Wadih Ghattas**, de l'Institut de chimie moléculaire et des matériaux d'Orsay (ICMMO – UPSaclay, CNRS), **Marie-Aline Martin-Drumel**, de l'Institut des sciences moléculaires d'Orsay (ISMO – UPSaclay, CNRS), **Freek Massee**, du Laboratoire de physique des solides (LPS – UPSaclay, CNRS), et **Sylvia Matzen**, du Centre de nanosciences et de nanotechnologies (C2N – UPSaclay, CNRS, Univ. de Paris), ont reçu la **médaille de bronze 2021 du CNRS**.

**Daniel Berveiller**, du laboratoire Écologie, systématique et évolution (ESE – UPSaclay, CNRS, AgroParisTech), et **Véronique Puill**, du Laboratoire de physique des deux infinis – Irène Joliot-Curie (IJCLab – UPSaclay, CNRS, Univ. de Paris), ont reçu la **médaille de cristal 2021 du CNRS**.

Le film d'animation «Le Nobel Chevelu» réalisé en collaboration avec l'équipe de recherche La Physique Autrement (UPSaclay) a reçu le **prix du public pour le meilleur court-métrage** au festival «Rencontres Internationales Sciences et Cinémas» 2021.

## ÉTUDIANTS / ÉTUDIANTES



© Jean-Marie Fischbach

L'équipe du **master de Physique fondamentale** de l'Université Paris-Saclay a remporté la **1<sup>re</sup> place du French Physicist Tournament 2021**, organisé par la commission jeunes de la Société française de physique.

**Clotilde Chambreuil**, **Alexandre Daby-Seesaram**, **Mathieu Diaz**, **Héloïse Rostagni** et **Ronan Scanff**, doctorants au Laboratoire de mécanique et technologie (LMT – UPSaclay, ENS Paris Saclay, CNRS, Sorbonne Univ.) sont les **lauréats du hackathon mondial en codage** organisé dans le cadre du workshop junior de la conférence mondiale WCCM-ECCOMAS 2021.

**Marie-Sophie de Clippele** (ENS Paris-Saclay) est lauréate du **prix de thèse «Valois – Jeunes chercheuses et chercheurs 2020»** décerné par le ministère de la Culture.

**Lesly-Ann Daniel**, doctorante au Laboratoire d'intégration de systèmes et de technologies (LIST – UPSaclay, CEA), a reçu le **prix 2020 jeunes talents France L'Oréal-UNESCO pour les femmes et la science** pour son travail sur l'analyse de la sécurité des logiciels.

**Maxime Maheu** a reçu le **prix «jeunes chercheurs» de la Fondation Bettencourt-Schueller** pour ses travaux de thèse en psychologie expérimentale réalisés au sein de l'unité mixte de recherche en Neuroimagerie cognitive (UNICOG/ NeuroSpin – UPSaclay, Inserm, CEA, CNRS).

**Virginie Sellier** a reçu le **prix OZCAR 2021** pour ses travaux de doctorat réalisés au Laboratoire des sciences du climat et de l'environnement (LSCE – UPSaclay, CNRS, CEA, UVSQ).

Le **Master Sport, Leisure and Event Management** (SLEM) de l'Université Paris-Saclay arrive en **3<sup>e</sup> position du classement Eduniversal 2021** des meilleurs masters français en Management du sport.

## ENTREPRISES / PROJETS



Le projet **INSPEX**, un dispositif portable de perception de l'environnement pour les personnes déficientes visuelles, développé au LIST (UPSaclay, CEA), a reçu le **prix «Étoiles de l'Europe 2020»**.

**Junior CentraleSupélec**, la Junior Entreprise de l'école, a remporté le **prix de la Meilleure junior-entreprise d'Europe 2021** pour la 3<sup>e</sup> année consécutive et le **prix Most Impactful Project 2021**.

Le projet **POFiné**, un dessert nutritif gourmand spécialement conçu pour les seniors, porté par des étudiants d'AgroParisTech, est lauréat de la **Journée de l'Entrepreneuriat Étudiant (JEE) de l'Université Paris-Saclay 2021** du Pépite PEIPS, catégorie «Produit – stade avancé», et a reçu le **Trophée d'argent** et le **prix Innovation Nutrition au concours ECOTROPHELIA**.



© UPSaclay

En ce début d'été 2021, comme prémices à la joie de nous retrouver bientôt sur nos campus, l'Université Paris-Saclay conforte sa position d'université de recherche intensive de rang international : pour la deuxième année consécutive, l'Université est classée 1<sup>re</sup> en mathématiques, 9<sup>e</sup> en physique et 12<sup>e</sup> en agriculture au niveau mondial dans le *Global Ranking of Academic Subjects* (GRAS). Elle confirme également l'excellence de sa recherche en se classant dans le Top 50 mondial dans onze disciplines,

notamment en médecine clinique (22<sup>e</sup> mondiale – 1<sup>re</sup> en France), en statistiques (29<sup>e</sup> mondiale), en ingénierie (technologies pour les télécommunications – 29<sup>e</sup> mondiale ; biotechnologie – 30<sup>e</sup> mondiale ; automatique et contrôle – 32<sup>e</sup> mondiale ; génie mécanique – 41<sup>e</sup> mondiale), et affiche une très belle progression de la pharmacie (30<sup>e</sup> mondiale) et de la chimie (49<sup>e</sup> mondiale).

Ce nouveau numéro de *L'Édition* complète ce tableau d'honneur en mettant l'accent sur des résultats de recherche majeurs au croisement de bien d'autres disciplines, où excellent les équipes des laboratoires de nos facultés, de nos grandes écoles et des organismes nationaux qui travaillent étroitement avec nous. Ainsi, entre enjeux scientifiques, technologiques et juridiques, vous découvrirez des résultats de recherche récents en matière de blockchain, comme un écho aux récents rebondissements de ce secteur qui questionne autant l'accès aux données que leur sécurité. En réponse à un modèle économique qui ravive chaque jour les polémiques, d'autres équipes cherchent et expérimentent de nouveaux modèles d'économie durable dans une logique d'économie circulaire. Hasard de calendrier des publications scientifiques ou air du temps, dont toute université de recherche est témoin, vous découvrirez ces deux thématiques dans ce journal.

Et pour faire honneur à nos performances en mathématiques, physique et chimie, c'est dans les temps courts et l'infiniment petit d'une part, et dans l'infiniment grand et le temps du fonds cosmologique d'autre part, que nous vous proposons un voyage à la vitesse de la lumière de nos lasers femtosecondes et une fenêtre sur la physique de l'au-delà. Vertigineux !

Et la santé me direz-vous ? C'est dans les transferts des laboratoires vers les start-up que nous l'aborderons ce trimestre avec près de 50 % de nos innovations dans le domaine.

Un grand cru pour ce nouveau numéro, avant d'entamer, à la rentrée, les vendanges scientifiques d'une prochaine année.

Très bel été à toutes et tous et bienvenue dès que vous le pourrez sur les voies vertes de nos campus qui reprennent vie.

**Sylvie Retailleau,**  
Présidente de l'Université Paris-Saclay



Titre

# L'entrepreneuriat étudiant à l'Université Paris-Saclay



© Eva Olah – IUT de Sceaux



© David Olivier Bouchez – Institut d'Optique

**Qu'ils ou elles soient animées par une simple curiosité, l'envie de s'investir dans un domaine qui a du sens, ou un véritable projet de création : de plus en plus d'étudiants et d'étudiantes tournent leur regard vers l'entrepreneuriat. Soucieux de répondre au mieux à ces nouvelles attentes, l'Université Paris-Saclay, ses composantes, établissements-composantes et universités membres associés offrent de nombreuses possibilités pour découvrir et/ou se former à l'entrepreneuriat tout au long de son cursus.**

Lorsqu'on les sonde sur leur avenir professionnel, près de 40 % des étudiants et des étudiantes présentent la création d'entreprise comme une option envisageable de leur parcours. «*L'actuelle génération considère l'entrepreneuriat comme une opportunité qu'il est important de savoir saisir dans un contexte économique incertain*», précise Pascal Corbel, chargé de mission Entrepreneuriat au sein de l'Université Paris-Saclay. Forte de ce constat, l'Université multiplie depuis plusieurs années les initiatives pour accompagner le plus efficacement possible cette dynamique. Parcours découverte, formations diplômantes, filières spécifiques : l'entrepreneuriat est aujourd'hui présent à tous les niveaux de l'Université et dans chacune de ses composantes, des référents sont là pour servir de guides.

## Des parcours pour découvrir l'entrepreneuriat

Être séduit par l'aventure entrepreneuriale

est une chose, en comprendre les tenants et les aboutissants en est une autre. C'est pour permettre aux étudiants de franchir ce cap et de se familiariser avec la démarche entrepreneuriale que le programme Maturaction a vu le jour en 2019. «*L'idée est de proposer à des groupes aux profils et aux niveaux d'études divers de tester leur fibre entrepreneuriale en se confrontant à l'exercice de la gestion de projets de recherche innovants à partir de cas réels issus des travaux des laboratoires de l'Université*», explique Pascal Corbel. Concrètement, dans le cadre de soirées ateliers, les étudiants sont invités à réfléchir, à partir de résultats scientifiques, à de possibles applications industrielles dont ils devront, en équipe, valider le potentiel.

Dans les établissements-composantes de l'Université, la sensibilisation des élèves-ingénieurs à l'entrepreneuriat commence également très tôt, souvent dès la première année, que ce soit dans le cadre d'hackathons, comme à l'Institut d'Optique Graduate School, ou de la Startup week à CentraleSupélec.

## Les formations diplômantes à destination des étudiants de l'Université Paris-Saclay

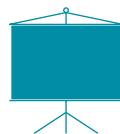
Pour les étudiants déjà sensibilisés à la démarche entrepreneuriale et souhaitant aller plus loin, l'Université propose plusieurs formations. Un étudiant en formation initiale ou continue, avec ou sans projet à développer, pourra ainsi se tourner vers l'un des quatre diplômes universitaires (Entrepreneuriat ; Création et développement de start-up innovantes ; Entrepreneuriat, droit, digital ; Intrapreneuriat) en cours du soir, en

présentiel ou à distance, pour apprendre à concevoir, lancer ou développer une activité.

En 3<sup>e</sup> année (L3), les étudiants ayant déjà un projet entrepreneurial peuvent opter pour la licence professionnelle Management et gestion des organisations de l'IUT de Sceaux qui accueille chaque année 24 étudiants. «*Notre objectif est de les former aux différentes dimensions de la création d'entreprise et de les mettre en relation avec l'écosystème entrepreneurial de Paris-Saclay. Bref, de les accompagner au plus près pour qu'ils passent à l'action !*», explique Nathalie Claret, co-responsable de la licence.

À un niveau supérieur, ceux souhaitant se spécialiser aux métiers liés à l'entrepreneuriat optent pour le master Management stratégique mention Entrepreneuriat et management de projet innovants de la Faculté Jean Monnet (Droit, Économie, Gestion) dont les cours peuvent être suivis à distance. «*À l'issue, ils s'orienteront soit vers la création d'entreprise, soit vers des postes de management de l'innovation en entreprise ou de consultants dans des structures d'accompagnement d'entrepreneurs*», indique Pascal Corbel, responsable du master.

Autre option pour les porteurs de projets entrepreneuriaux déjà diplômés : s'engager dans le diplôme inter-établissements étudiant-entrepreneur (D2E) du Pépite PEIPS – le réseau des jeunes entrepreneurs du territoire Paris-Saclay – qui leur fera suivre un programme d'accompagnement entrepreneurial individualisé tout en bénéficiant des avantages du statut national d'étudiant-entrepreneur. «*Conçu comme un programme de pré-incubation, le D2E encourage l'apprentissage par l'action. Il dote les*



étudiants de compétences utiles à la création, mais également valorisables en entreprise», explique Florence Law, responsable du D2E.

Quant aux doctorants et doctorantes qui souhaitent apprendre à valoriser leur recherche et à entreprendre, ils peuvent se tourner vers les parcours des Doctor'Preneuriales dont les modules de formation sont assurés par des professionnels de l'innovation et de la création d'entreprises de l'Université et de ses partenaires.

### Les formations diplômantes à destination des étudiants de l'Université Paris-Saclay

Souvent précurseurs en la matière, les établissements-composantes de l'Université offrent eux aussi des parcours ou filières spécifiques orientés entrepreneuriat, comme l'itinéraire Entrepreneuriat d'AgroParisTech qui propose aux étudiants, pendant leur cursus, un accompagnement sur un projet de création d'entreprise, d'activité nouvelle à transférer. Ces Grandes Écoles vont jusqu'à proposer des incubateurs intégrés, à l'image du Food In'Lab d'AgroParisTech. Les élèves de l'Institut d'Optique peuvent, eux, dès leur deuxième année, et ce depuis 2006, intégrer la filière Innovation-Entrepreneurs (FIE). «*Mis aux commandes de projets d'entreprises technologiques très concrets, ils disposent d'un accompagnement hebdomadaire, par temps forts de plusieurs semaines, sur l'un de nos trois centres entrepreneuriaux "503" et de l'appui d'une cinquantaine de formateurs, pour donner vie, en équipe, à leur projet. Une expérience forte dont ils sortent transformés*», explique David Olivier Bouchez, responsable de la FIE. À Centrale-Supélec, outre un parcours Entrepreneuriat accessible dès la première année, les élèves de troisième année peuvent choisir d'intégrer l'historique filière Entrepreneurs créée en 2000 ou la nouvelle filière Innovation et Intrapreneuriat créée en 2020. «*L'ambition, au-delà de la formation, est de mettre nos élèves au cœur d'un écosystème constitué d'entrepreneurs, de fonds d'investissement, d'un fablab, d'un incubateur, etc., et de les armer au mieux pour l'avenir*», conclut Jean-François Galloüin, professeur à CentraleSupélec.

<https://www.universite-paris-saclay.fr/formation/entrepreneuriat-etudiant>

Titre

## Un master pour se former au tourisme responsable

Dans un mouvement de responsabilité citoyenne, l'Université Paris-Saclay propose désormais un master en Ingénierie de la transition touristique et écologique (ITTE). Encore peu présente sur le territoire français, une telle spécialisation au tourisme durable et responsable représente l'avenir des métiers du tourisme. «*Il s'agit d'impulser une bifurcation dans le tourisme actuel en réduisant son impact sur l'environnement et en respectant d'avantage les cultures locales*», déclare Frédéric Leriche, responsable du master ITTE. Dès septembre 2021, cette formation sera accessible aux étudiants inscrits en deuxième année de master, mention Gestion des territoires et développement local. Réalisée en apprentissage, elle propose douze semaines de cours en alternance étalés de septembre à mars, suivis de cinq à six mois d'immersion totale au sein de l'organisme d'accueil. «*L'objectif de la formation est la professionnalisation des étudiants*», précise Frédéric Leriche. Pour cela, les étudiants sont formés en situation réelle à travers un travail d'expertise sur des projets de développement touristique, en partenariat avec le Conseil départemental des Yvelines.

<https://www.universite-paris-saclay.fr/formation/master/gestion-des-territoires-et-developpement-local/m2-master-ingenierie-de-la-transition-touristique-et-ecologique>

Titre

## Détourner la science au profit de l'art



© Christophe Peus

Soutenue par la Diagonale Paris-Saclay, l'unité d'enseignement « Art et Optique » ouvre ses portes aux scientifiques passionnés d'art. Accessible en troisième année de licence Physique et Applications, elle est conçue par Gaël

Latour, maître de conférences à l'Université Paris-Saclay, et Mathilde Lavenne, artiste-vidéaste, avec la médiation de l'association Societies. «*Cet enseignement fait découvrir les sciences du patrimoine. Aucun prérequis artistique n'est nécessaire*», révèle le scientifique. À travers douze séances de deux heures chacune, le duo transmet une nouvelle vision de la recherche à une vingtaine d'étudiantes et d'étudiants inscrits. En proposant diverses activités au croisement des deux disciplines, ils leur font découvrir les bases du dessin ainsi que certaines techniques d'imagerie optique. Tout au long du semestre, les étudiants laissent s'exprimer leur imagination en réalisant plusieurs productions artistiques tels que croquis et aquarelles, et en créant une œuvre individuelle à partir d'images scientifiques collectées lors de visites de laboratoires dédiés aux sciences du patrimoine.

[http://hebergement.universite-paris-saclay.fr/l3papp/?page\\_id=6232](http://hebergement.universite-paris-saclay.fr/l3papp/?page_id=6232)

Titre

## Chaire BOPA : des technologies numériques pour améliorer les pratiques au bloc



© Chaire BOPA

Lancée en janvier 2020 et installée à l'hôpital Paul-Brousse AP-HP, la chaire innovation Bloc opératoire augmenté (BOPA) regroupe acteurs du bloc, ingénieurs et chercheurs de l'Université, d'Inria et du CNAM. «*Le projet a pour objectif de transformer la manière dont on fait des traitements invasifs au sens large*», explique le Pr Eric Vibert, chirurgien, professeur à la Faculté de médecine Paris-Saclay et fondateur de la chaire. La chaire accueille un bloc opératoire factice pour tester des dispositifs de réalité augmentée, de robotique collective ou de communication, et améliorer les pratiques. Elle contribue à augmenter les sens de ses acteurs (par la vue, le toucher et la parole) et à développer la télé-expertise et de nouvelles méthodes d'apprentissage.

<http://www.chaire-bopa.fr/>



Titre

## Ciel et espace : les sciences de la Terre et de l'Univers à l'honneur !

© Les petits cueilleurs d'étoiles  
© Maroun Hobib

**Avec la belle saison, les occasions de tourner son regard vers le ciel se font plus nombreuses. Des opportunités au cœur de plusieurs initiatives et événements jalonnant l'été.**

Deux ans après la 1<sup>re</sup> édition de « On the Moon Again », qui avait réuni 1 350 événements dans 77 pays, les amateurs d'astronomie sont à nouveau appelés à sortir dans les rues avec leur télescope entre le 16 et 18 juillet 2021. « Quand on pose un télescope en pleine rue, les gens qu'on croise n'ont pour la plupart jamais imaginé pouvoir observer la Lune d'aussi près. C'est la meilleure façon de faire de l'astronomie populaire, de créer une étincelle », raconte Sylvain Bouley, planétologue au laboratoire Géosciences Paris-Saclay (GEOPS – Univ. Paris-Saclay, CNRS) et coordinateur de l'événement.

Le chercheur est également le président de l'association « Les p'tits cueilleurs d'étoiles », créée en 2016, qui enchante les enfants hospitalisés dans toute la France. « On s'habille en astronaute et on leur ramène une petite météorite. Ce sont des moteurs d'émerveillement pour commencer à parler des étoiles et être à l'écoute de l'enfant. » Des soirées d'observations au télescope, des rencontres ou encore des mises en orbite en réalité virtuelle sont aussi organisées par l'association. « Il faut que l'enfant s'amuse avant d'apprendre. C'est un instant d'évasion pour eux mais aussi pour les parents. »

Tel est aussi l'objectif du festival « Du Big Bang aux big bands », qui annonce sa 2<sup>e</sup> édition le 3 juillet. Des discussions avec des astrophysiciens, des concerts, des observations en direct depuis de grands observatoires et bien d'autres surprises sont à suivre toute la nuit sur la chaîne Youtube Le Sense of Wonder. « L'ambi-

tion du festival est de s'amuser et de croiser art et sciences » explique Hervé Dole, astrophysicien et vice-président Art, culture, science et société à l'Université Paris-Saclay.

Mais la fête n'aurait pas été complète sans le contact radio réalisé lors d'une demi-journée spéciale, le 17 juin, avec le spationaute Thomas Pesquet, en orbite à bord de la Station spatiale internationale. Animé par le journaliste Fred Courant, la spationaute Claudie Haigneré, le chercheur Raphaël Haumont et d'autres, l'événement a été retransmis depuis les amphis du plateau de Saclay, de la Faculté Jean Monnet, de l'UVSQ, ainsi qu'en ligne.

<https://www.onthemoonagain.org/>

<http://lespittscueilleursdetoiles.fr/>

<http://www.dubigbangauxbigbands.fr/>

[https://www.youtube.com/watch?v=rYuhW9uE-JLU&ab\\_channel=Universit%C3%A9Paris-Saclay](https://www.youtube.com/watch?v=rYuhW9uE-JLU&ab_channel=Universit%C3%A9Paris-Saclay)

Titre

## Sciences pour toutes et pour tous

Financé par le ministère de la Cohésion des territoires, le projet Sciences pour toutes et pour tous cherche à rapprocher l'Université des collégiens et collégiennes de réseaux d'éducation prioritaire en favorisant le contact avec les chercheurs. « Un des objectifs est de leur présenter quelques grandes questions scientifiques actuelles, le fonctionnement et la diversité des métiers de la recherche », explique Hélène Courvoisier, biologiste à l'Université Paris-Saclay et membre du projet. Avec d'autres chercheurs et des artistes, elle se rend dans les collèges lors de demi-journées Déclics. « Les échanges informels avec des adultes passionnés par leur métier sont très riches pour ces élèves et, espérons-le, sources de déclics pour leur orientation. » Trois écoles d'été, entre juin et juillet, viseront à faire redécouvrir l'informatique et les mathématiques aux collégiennes et lycéennes et à lutter contre les stéréotypes de genre autour de ces disciplines.

Titre

## Une excursion polaire pour le climat



© Niels Dutrievoz

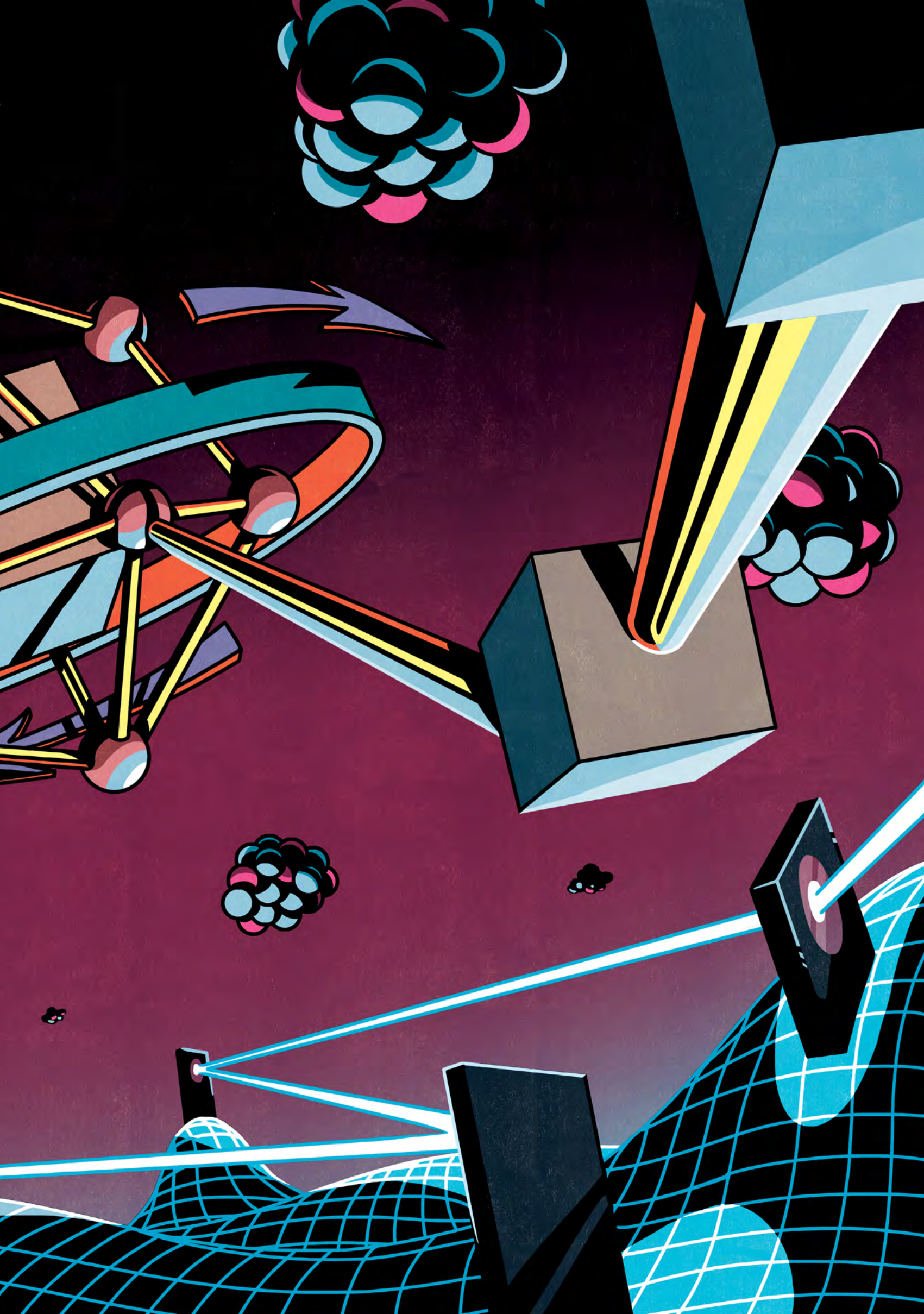
Six étudiants et étudiantes des Écoles nationales supérieures, dont l'ENS Paris-Saclay, préparent une expédition australe de huit mois à bord d'un voilier polaire. En collaboration avec des laboratoires français et étrangers, et accompagnés de trois marins, ils embarqueront pour le projet Antarctique 2.0°C en septembre 2021. En combinant leurs compétences en biologie, chimie, géoscience et sociologie, ils mesureront l'impact du climat et de l'être humain sur les écosystèmes austraux. Leur but est de documenter, d'éduquer et de sensibiliser le grand public et les plus jeunes aux enjeux climatiques, notamment grâce à un journal de bord numérique transmis aux personnels enseignants de plus de 200 classes primaires

françaises. « Bien plus qu'une expédition scientifique interdisciplinaire, il s'agit d'une mission pédagogique de sensibilisation », déclare Niels Dutrievoz, l'un des créateurs du projet. Une série de vidéos, plusieurs podcasts et une chaîne YouTube seront également mis en place avec le soutien des marraines et parrains de l'expédition : la navigatrice Clarisse Crémer, la chercheuse Delphine Lannuzel, le journaliste Jamy Gourmaud et l'explorateur Mike Horn.

<https://www.j2d.org/antarctique2d>

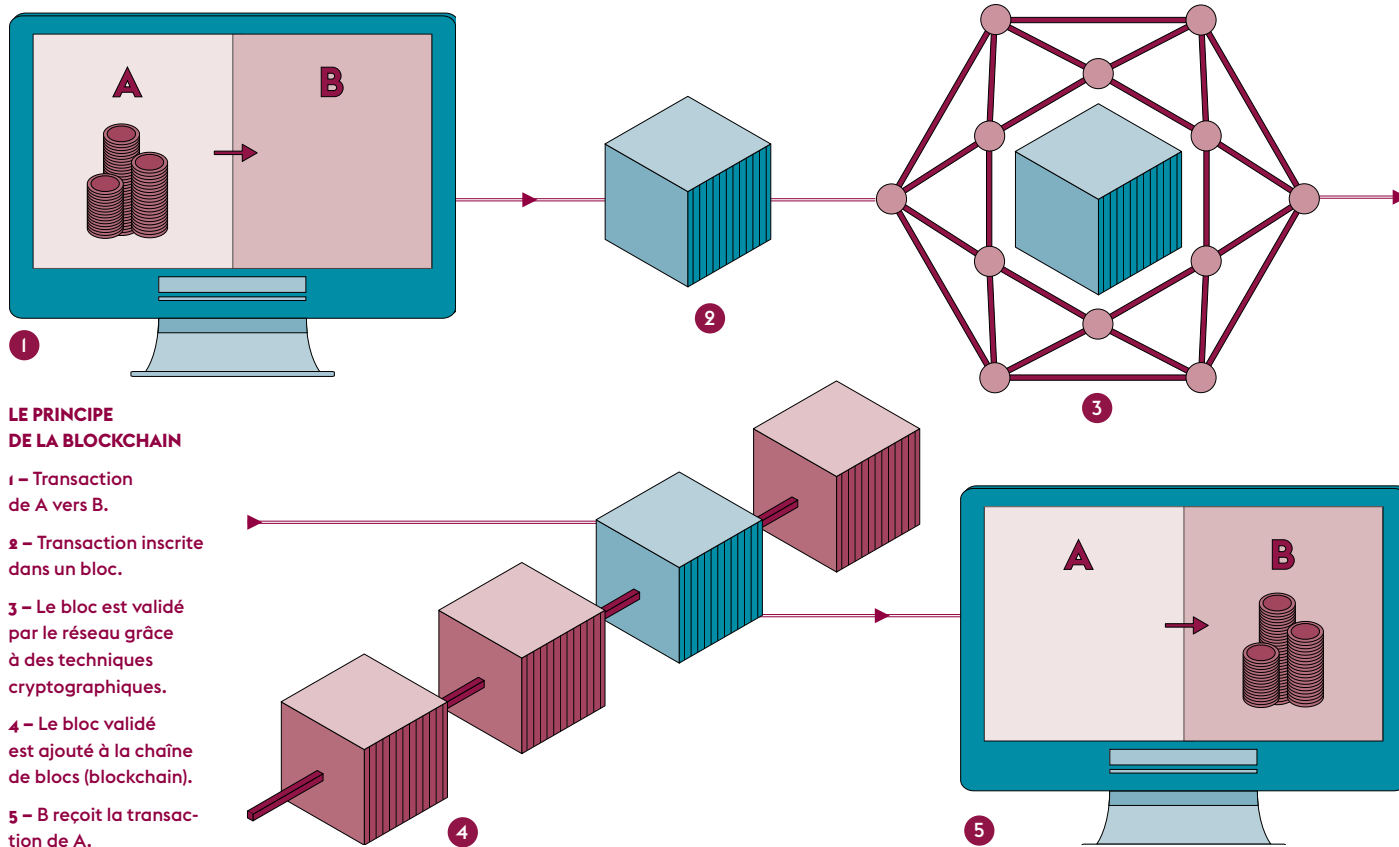
Illustrations  
page de droite  
et page 22 :

Maxime Mouysset



Titre

# Déverrouiller le potentiel de la blockchain



**La blockchain, ou chaîne de blocs, connaît aujourd’hui un déploiement plus large, qui nécessite la levée d’un certain nombre de verrous scientifiques, technologiques et juridiques sur lesquels travaillent les scientifiques de l’Université Paris-Saclay.**

Bitcoin (2008) et Ethereum (2015) pour les plus connus, Zcash (2016), Tezos (2018) ou encore Algorand (2019) pour les plus récents. Dotés de millions d’utilisateurs dans le monde, ces différents réseaux d’échanges de cryptomonnaies (*token*) reposent sur la technologie blockchain. Celle-ci s’apparente à une base de données partagée, transparente et sécurisée, qui fonctionne de façon décentralisée et sans intermédiaire de contrôle. Assimilée à un registre distribué, elle comporte tout l’historique des transactions réalisées sur le réseau par les participants. Les transactions sont regroupées et inscrites au sein de blocs de données qui s’enchaînent les uns aux autres. Avant d’être ajouté à la chaîne, chaque nouveau bloc est préalablement validé par les participants selon des techniques propres à la blockchain.

Au final, chaque utilisateur possède la même copie du registre.

Encore largement associée au transfert d’actifs dans l’inconscient collectif, cette technologie de stockage et de partage d’informations s’étend désormais à d’autres secteurs (santé, *supply chain*, propriété intellectuelle, gouvernance, vote, énergie, automobile...) et intéresse de plus en plus le monde industriel. Pensée au départ pour être publique et ouverte à tous – un format qui reste encore le plus populaire –, la technologie a accouché de formes privées dont l’accès se limite aux seuls utilisateurs autorisés, comme celles développées par les entreprises.

### Il était une (des) fois la preuve de travail

Si toute une série de paramètres varie d’une blockchain à l’autre, le mécanisme de validation des nouveaux blocs de données, ou protocole de consensus, est la pierre angulaire du maintien de la cohérence du système. À l’apparition de Bitcoin et largement reprise par les blockchains publiques suivantes, la méthode utilisée est la *proof of work* (preuve de travail ou preuve de calcul) ou PoW, basée sur la résolution de problèmes algorithmiques. Ce mécanisme de validation répond à une logique

crypto-économique : l’utilisateur qui résout le premier l’algorithme voit ses efforts (et sa puissance de calcul) rétribués par le versement de tokens. Dans ces conditions, il devient plus rentable pour les participants de vouloir sécuriser le réseau que de l’attaquer. « Si pour valider les blocs, une personne doit réaliser un effort et est rémunérée en retour, elle sera plus encline à respecter le protocole et ne pas mettre en péril la blockchain », confirme Sara Tucci-Piergiovanni, cheffe de laboratoire et experte blockchain du Département ingénierie des logiciels et des systèmes (DILS) du CEA-List (Univ. Paris-Saclay, CEA). Et plus un réseau dont le mécanisme de validation se base sur la PoW comporte d’utilisateurs, plus sa sécurité est garantie.

Toutefois, même si elle est jugée quasi infailible et infalsifiable, la blockchain n’est pas à l’abri d’attaques, comme celle dite de 51 %. Elle se produit lorsqu’un des utilisateurs dispose de suffisamment de puissance de calcul pour être dominant et prendre le contrôle de la blockchain. Un type d’attaque peu probable dans le cas des grosses blockchains, mais qui devient possible avec les plus petites.

Un des principaux problèmes des blockchains dont le protocole de consensus se base sur la preuve de travail est leur voracité énergétique.

« Les plus optimistes disent que pour valider une transaction grâce à la PoW, cela équivaut à consommer autant d'énergie qu'une maison de quatre personnes par jour en France », commente Sara Tucci-Piergiovanni. Et rien que sur Bitcoin, les nombres de transactions s'élève en moyenne à 330 000 par jour.

Outre son coût énergétique et écologique, la PoW limite aussi le passage à l'échelle : « les blockchains publiques les plus populaires, comme Bitcoin et Ethereum, rencontrent des problèmes d'engorgement : une dizaine de transactions par seconde tout au plus, ce qui est relativement faible. On doit trouver des systèmes de consensus, de représentation de données et de structuration des transactions plus performants, pour passer à plusieurs milliers de transactions par seconde », signale Daniel Augot, chercheur à Inria Saclay et membre du collectif de recherche académique francilien BART (Blockchain Advanced Research & Technologies).

### L'enjeu de la preuve

C'est pour ces raisons qu'une autre méthode pour atteindre le consensus distribué, apparue ces dernières années, gagne du terrain au sein des blockchains publiques : la *proof of stake* (preuve d'enjeu) ou PoS, qui n'implique pas de consommation énergétique. La PoS ne demande pas aux utilisateurs d'utiliser leur puissance de calcul, mais de prouver qu'ils détiennent un certain montant de cryptomonnaie dans la blockchain. « Plus l'utilisateur a d'argent dans le système, plus il a de chances d'être choisi comme validateur des blocs », souligne Daniel Augot. Comme l'utilisateur engage son argent et que l'argent investi est bloqué, il a tout intérêt à participer à la bonne marche du système. Un mécanisme au cœur du fonctionnement des blockchains Cosmos, Cardano ou Tezos, et qu'Ethereum s'est engagée à appliquer d'ici fin 2021.

« Avec la preuve d'enjeu, il y a toutefois une petite probabilité que deux validateurs soient choisis en même temps pour valider une transaction et l'inscrire dans le prochain bloc. Cela peut produire deux blocs concurrents, dont l'un des deux doit être rejeté. Si cela arrive, la règle est de choisir la chaîne la plus longue », signale Sara Tucci-Piergiovanni. Un nouvel algorithme développé et appliqué par certains protocoles blockchain, comme Hyperledger et Tendermint, évite cette incohérence temporaire. Cet algorithme de consensus, appelé *byzantine fault tolerant* (BFT), est tolérant aux failles de communication du réseau et fait appel à une liste de validateurs connue au départ. Et pour encore plus de sécurité, les blockchains les plus récentes combinent PoS et BFT : « elles comportent un comité de validateurs qui a pour mission de

signer chaque nouveau bloc généré à travers un algorithme BFT. Si un quorum de signatures est atteint pour un bloc donné, alors celui-ci est accepté immédiatement par le reste du réseau, et ça recommence de la même façon pour un nouveau bloc », explique Sara Tucci-Piergiovanni.

Au CEA-List, les chercheurs ont récemment analysé le protocole de consensus BFT de la blockchain Tendermint. « On y a trouvé quelques failles et vulnérabilités qui ont depuis été corrigées », évoque Sara Tucci-Piergiovanni. Ces travaux ont aussi confirmé la capacité de Tendermint à tolérer jusqu'à un tiers de participants malveillants, sans que cela mette en danger la cohérence du système. À l'heure actuelle, l'équipe travaille sur les blockchains *low power*, comme Tezos, qui utilisent la PoS et l'algorithme BFT. « On continue d'améliorer la sécurisation et les performances de ces systèmes. »

### Prouver sans montrer

Garantir la confidentialité des transactions, alors que dans une blockchain publique, par essence ouverte, tout le monde voit tout, est un des autres enjeux – cryptographique – à résoudre. Et la solution pourrait venir de la technique *zero knowledge proof* (ZKP) adoptée par la blockchain Zcash, qui permet de prouver que les critères de validité de la transaction ont été satisfaits sans avoir à les montrer en clair, c'est-à-dire sans donner les éléments de la preuve. Ni l'émetteur, ni le destinataire ou le montant de la transaction ne sont connus. « Un peu comme si dans le jeu "Où est Charlie ?", pour prouver qu'on a trouvé le personnage dans l'image sans le montrer précisément, on superposait une feuille bien plus grande et perforée à l'endroit exact du personnage », compare Daniel Augot.

Autre avantage de la ZKP : les preuves apportées sont bien plus courtes que la vraie preuve. Grâce à ce raccourcissement, il est possible de valider un grand nombre de transactions grâce à une seule preuve. « La zero knowledge proof excite beaucoup les gens, notamment les industriels, en tant que solution pour passer à l'échelle, et d'importants efforts de standardisation sont actuellement mis en œuvre sur cette technologie », constate Daniel Augot.

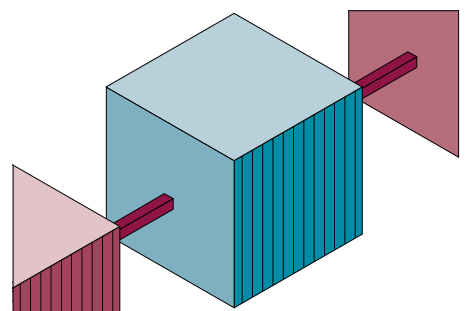
### La vérification des contrats intelligents

Un autre des attributs de la blockchain intéresse également grandement les industriels : les *smart contracts* (contrats intelligents ou autonomes). Assez petits – ils font entre une trentaine et une centaine de lignes de code –, ces programmes informatiques exécutent automatiquement au sein du réseau un ensemble d'instructions prédéfinies, sans qu'une intervention humaine soit nécessaire

une fois démarrés. Bien des enjeux portent sur leur langage et leur vérification. « Il s'agit de développer des outils de vérification pour que les utilisateurs, notamment les industriels, soient en mesure de décrire leur programme et son comportement normal », explique François Bobot, chercheur au DILS du CEA-List. Ces outils doivent à la fois réussir à aisément exprimer les propriétés du programme et à les vérifier. « Or le milieu des smart contracts est très actif. Il existe énormément de langages informatiques pour les coder : des nouveaux, mais aussi des anciens mis au goût du jour. »

Au CEA-List, François Bobot et ses collègues utilisent la plateforme Why3 développée par le Laboratoire de recherche en informatique (LRI) – devenu le Laboratoire des méthodes formelles (LMF – Univ. Paris-Saclay, ENS Paris-Saclay, Inria, CentraleSupélec) – pour vérifier ces programmes. « Why3 dispose d'un langage assez puissant et de beaucoup d'outils pour facilement exprimer les propriétés voulues. On l'utilise pour aller vers les langages de programmation qu'utilisent les industriels, comme Solidity. » L'équipe fait appel aux méthodes formelles, telles que l'interprétation abstraite, la vérification déductive, la vérification de modèle ou *model checking*. « À l'aide de formules mathématiques, on essaye de décrire le plus finement possible le comportement du programme qui est attendu, de manière à vérifier qu'il suit bien son cahier des charges. »

### De nouveaux secteurs d'application



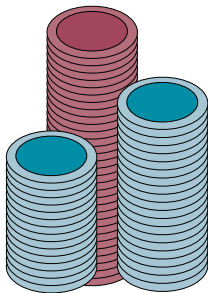
Aujourd'hui, la blockchain se déploie de plus en plus dans des domaines où la traçabilité et l'audit de produits est essentielle, comme la *supply chain* (chaîne d'approvisionnement). BART et IRT System X mènent par exemple un projet de carnet de suivi de véhicule. L'idée est d'enregistrer dans une blockchain toutes les interventions réalisées, de la numérotation des pièces détachées dans l'usine jusqu'à l'arrivée du véhicule à la casse. Il s'agit de construire pour un produit un passeport conforme à un ensemble de règles et de critères imposés par les législations. « Aujourd'hui, il n'y a pas d'autorité centrale de contrôle capable de faire un travail de validateur transnational.



Et il n'y a pas d'autre technologie que la blockchain pour répondre à ce défi», constate Sara Tucci-Piergiovanni.

Dernièrement, le CEA-List a travaillé avec TEO (The Energy Origin), la start-up incubée par Engie, et Bureau Veritas, le leader mondial de l'inspection, de la certification et des essais en laboratoire, pour lancer une application de traçabilité de l'énergie verte s'appuyant sur la blockchain et l'exécution de *smart contracts*. «Il s'agissait de s'assurer que les lignes de crédits d'énergie verte produites à un endroit n'étaient utilisées qu'une seule fois ailleurs», signale François Bobot. Avec la start-up Connecting Food, le CEA-List tente d'inciter les acteurs de la filière alimentaire à entrer leurs certificats dans la blockchain pour une transparence accrue.

### La place du juridique



Au-delà des problématiques technologiques, la blockchain soulève des questionnements juridiques et réglementaires, que le législateur commence tout juste à s'approprier. Et le travail n'est pas simple. «La technologie n'est pas stable, tous comme ses usages. Or il est difficile d'encadrer juridiquement un objet en évolution», annonce Mélanie Clément-Fontaine, chercheuse au laboratoire de Droit des affaires et nouvelles technologies (DANTE – Univ. Paris-Saclay, UVSQ). Trouver le bon timing pour légiférer n'est pas aisé. «Si on intervient trop tôt, la règle empêche le développement de la technologie.» L'aspect transfrontalier de la technologie ne facilite pas non plus l'application de règles simples.

«Cela ne veut pas dire pour autant qu'il y a un flou juridique, car on dispose d'un arsenal juridique sur lequel s'appuyer. Tout l'enjeu est de réussir à adapter aux usages de la blockchain», nuance Mélanie Clément-Fontaine. Logiquement, le domaine des crypto-monnaies, où la technologie est la plus avancée, est le premier dans lequel le droit s'est inscrit : «il est venu clarifier la qualification des tokens, qui n'ont pas un statut de monnaie mais d'actif numérique». La loi PACTE (plan d'action pour la transformation des entreprises) promulguée en 2019 autorise la création de titres financiers

(actions) sous blockchain. «Grâce à elle, il est désormais possible d'émettre des titres financiers, ce qui était auparavant réservé aux banques», signale Véronique Magnier, chercheuse à l'Institut droit éthique patrimoine (IDEP – Univ. Paris-Saclay). La loi est également venue ajouter un principe d'équivalence : un titre financier sur blockchain a la même portée qu'un titre sur un compte bancaire. Un principe qui remet en cause l'hégémonie des banques et que l'Autorité de la concurrence surveille par ailleurs. «Quand des acteurs possèdent leur propre crypto-monnaie, cela crée un écosystème qui joue sur la concurrence. Le consommateur est capté et verrouillé dans ce système», souligne Mélanie Clément-Fontaine.

Une autre question, résolue par la loi Sapin II de 2016, est celle de l'encadrement fiscal des transactions réalisées dans la blockchain, et c'est l'application d'un prélèvement forfaitaire qui a été retenue. Sur la question du blanchiment d'argent, là aussi le droit est intervenu en adoptant en 2019 une loi qui lève l'anonymat des utilisateurs en cas de contrôle par l'administration fiscale et les pouvoirs publics. «Le rôle de l'État est de s'assurer que les individus sont protégés lorsqu'ils ont recours à cette technologie : il se montre attentif au respect des données à caractère personnel, au droit du consommateur et à l'absence d'escroquerie ou d'action illicite», résume Mélanie Clément-Fontaine.

### Bouleverser la gouvernance des entreprises

L'inscription de titres financiers dans une blockchain ouvre tout un champ des possibles en matière de gouvernance des entreprises. Classiquement, la détention d'actions dans une entreprise accorde à une personne le droit de voter lors des assemblées générales. Si le droit français autorise depuis 2001 le vote à distance, notamment électronique, il est en pratique assez peu utilisé car jugé insuffisamment sécurisé. «Il y a eu de nombreux cas de fraudes. Les entreprises sont demeurées très frileuses vis-à-vis de ce mode de scrutin», signale Véronique Magnier. Mais la crise sanitaire actuelle est venue tout changer. La suspension des déplacements et des réunions en présentiel a obligé les entreprises à développer des plateformes de vote sous blockchain, la plupart privées.

La blockchain promet également de soulager la gestion administrative des entreprises. En France et à l'étranger, les sociétés sont soumises par la loi à la tenue de nombreux registres : celui des mouvements de titres ou registre des actionnaires, ceux des procès-verbaux d'assemblées d'associés et d'actionnaires, les livres comptables... «La vraie révolution pour les directions juridiques des entreprises serait de transférer sur

une blockchain tout l'historique de ces registres habituellement conservés sous format papier. Un transfert qu'il faudra toutefois anticiper, pour éviter toute rupture de l'information.»

### L'argument de la preuve juridique

Dans le domaine de la propriété intellectuelle, la blockchain constitue un bon moyen de démontrer l'existence de l'antériorité d'une création. «Les personnes sont titulaires de droits et si quelqu'un les conteste, il doit prouver l'existence d'un droit antérieur», souligne Véronique Magnier. La preuve étant au cœur du droit lors d'un procès, à quel type de preuve la blockchain s'apparente-t-elle ? Les droits français et européen prévoient différents modes de preuve : preuve littérale ou écrite, preuve par témoin, preuve par indices et présomptions, aveu et serment. Parmi les preuves écrites, la loi reconnaît la preuve numérique et la valeur d'un écrit numérique, qui doivent répondre à une certaine fiabilité. «À partir du moment où il y a un protocole cryptographique, on considère que la preuve est avancée. Mais tant qu'un législateur français ou européen n'aura pas dit qu'une preuve par blockchain équivaut à une preuve avancée ou une preuve simple, on restera dans le flou.» Ce qui n'empêche pas certains avocats de protéger dès à présent la propriété intellectuelle de leurs clients en utilisant des plateformes blockchain dédiées. «La question sera de voir comment réagira un juge face à ce type de preuve lors d'un procès.»

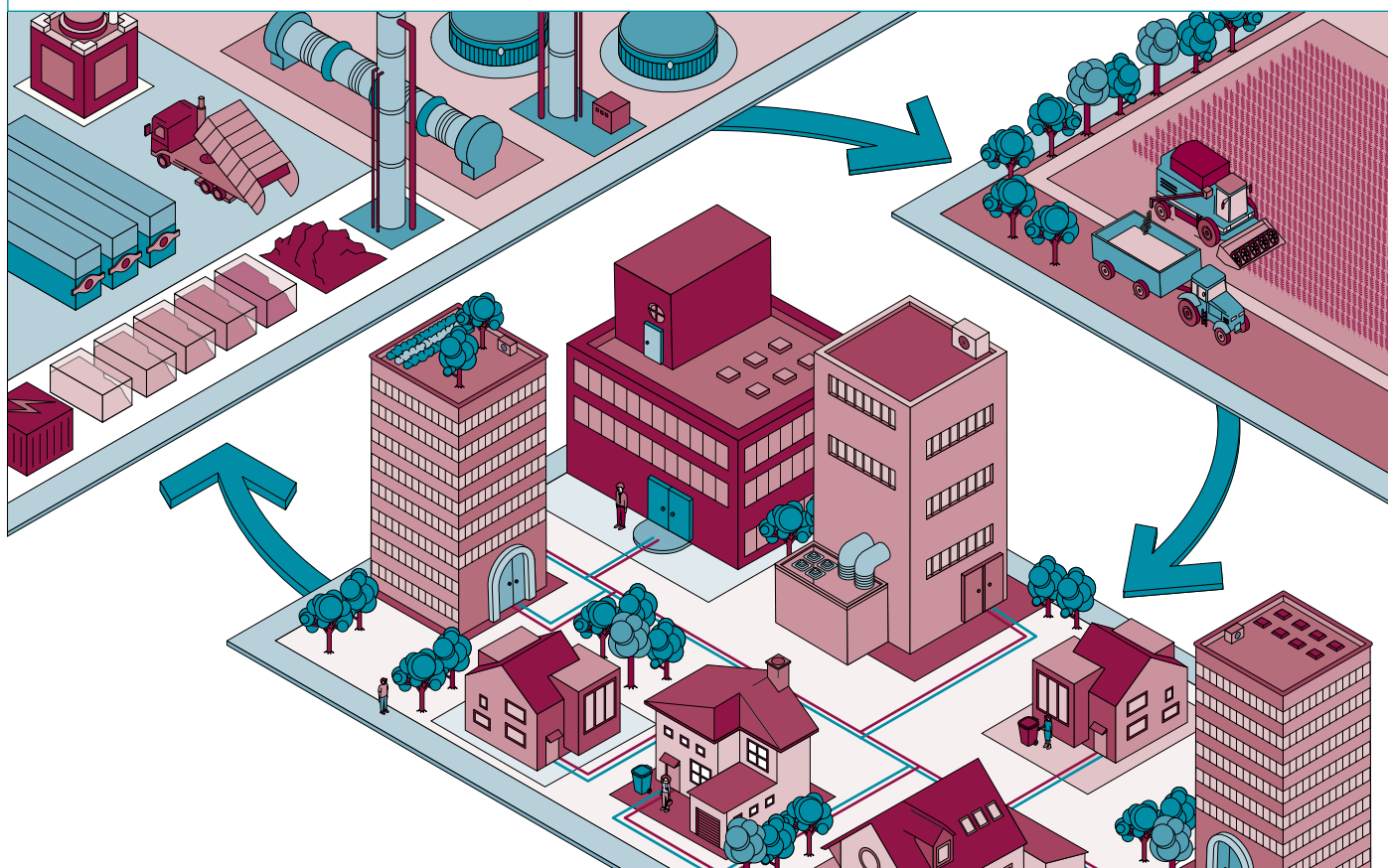
Dans l'immédiat, un effort de formation des juristes et des personnels des entreprises est à prévoir. «Aujourd'hui, les entreprises n'ont pas forcément en tête toutes les applications possibles de la blockchain. Les personnes doivent être formées pour comprendre cette technologie et la maîtriser», commente Véronique Magnier. Un virage technologique à la source d'un questionnement sociologique, certains métiers étant amenés à disparaître au sein des entreprises. «Cela demandera forcément d'arbitrer entre intelligence humaine et intelligence artificielle», avise la chercheuse.

### Publications

- Yackolley Amoussou-Guenou et al. Rational vs Byzantine Players in Consensus-based Blockchains. AAMAS 2020: 43-51.
- Zeinab Nehaï, François Bobot. Deductive Proof of Industrial Smart Contracts Using Why3. *Formal Methods*. FM 2019 International Workshops.
- Mélanie Clément-Fontaine. Les smart contracts et la propriété intellectuelle, dossier spécial *La blockchain dans l'univers de la mode*, Dalloz IP/IT 2018/10, pp.540-543.
- Véronique Magnier, Patrick Barban. The Potential Impact of Blockchains on Corporate Governance: A Survey on Shareholders' Rights in the Digital Era. 2019.

Titre

# Une transition vers l'économie circulaire



**Afin d'accompagner la transition écologique des industries de production de masse, les scientifiques de l'Université Paris-Saclay développent des modèles économiques durables et de nouveaux procédés circulaires performants.**

À l'instar des états comme la France, s'engageant en faveur d'une neutralité carbone à l'horizon 2050, les populations leur emboîtent le pas. Le développement durable s'ancre progressivement dans les esprits et les initiatives écoresponsables se multiplient. Mais face à l'urgence climatique et ses conséquences pour la planète et ses habitants, il faut repenser l'économie globale. Cela implique notamment une plus grande sobriété, un arrêt de la surexploitation des ressources – limitées – de la planète, et une réduction de l'empreinte carbone. Au cœur de cette réflexion : l'aménagement d'une économie circulaire pour une transition pérenne conciliant écologie et développement économique.

## Produire à partir des déchets

Actuellement, l'économie se base essentiellement sur un modèle linéaire : il consiste à

extraire des ressources naturelles pour fabriquer des produits – et leurs emballages – qui sont ensuite commercialisés, distribués, utilisés puis jetés en fin de vie. Un modèle énergivore et générateur de déchets et de polluants. En bouclant les flux de matière et d'énergie, l'économie circulaire propose de valoriser localement les déchets en les transformant en matières premières, et de réduire l'impact environnemental de la consommation.

Ces dernières années, plusieurs actions durables ont été instaurées à grande échelle, comme la récupération de l'énergie produite par l'incinération des déchets et le recyclage des plastiques, des métaux et des verres. Néanmoins, ces processus restent encore à optimiser, car la valeur des déchets incinérés part majoritairement en fumée et la qualité des plastiques recyclés n'égale pas celle de ceux d'origine. À l'échelle du citoyen, des actions en faveur d'une économie circulaire sont également possibles : en privilégiant une consommation plus responsable, basée sur les circuits-courts et le compostage ; ou plus simplement en prolongeant la durée de vie des produits de consommation par l'échange de services ou de biens, la réparation de produits usés et les bonnes habitudes de tri des produits recyclables.

Toutefois, comme dit le proverbe : « *l'union fait la force* ». Pour être efficace, l'économie circulaire demande un investissement et une adhésion plus franche, notamment de celles aux avant-postes : les industries de production de masse. Pour rappel, en France, le secteur de la construction produit environ 30 % des gaz à effet de serre émis sur le territoire, celui de l'agroalimentaire est responsable d'environ 30 % des déchets ménagers, majoritairement des aliments non consommés, et celui du transport ne recycle que très peu sa production marchande. Or les entreprises responsables, fabriquant des produits en matières recyclées, facilitant leur démontage, réduisant les coûts de réparation et recyclant leurs propres déchets, limitent fortement leur empreinte carbone.

## Une action vertueuse à l'échelle locale

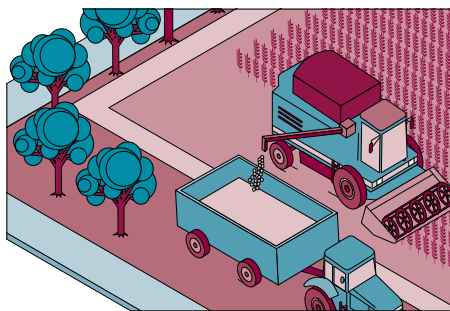
L'économie circulaire présente bien des qualités. « *Mais elle n'est vertueuse que lorsqu'elle s'intègre dans une dimension territoriale* », s'exclame André Torre, chercheur au laboratoire des Sciences pour l'action et le développement : activités, produits, territoires (SADAPT – Univ. Paris-Saclay, INRAE, AgroParisTech)

## Économie circulaire

et spécialiste du développement territorial durable. Car si la notion de territoire est large, sa signification l'est beaucoup moins : il s'agit de favoriser la circulation locale des biens et des services en rapprochant les producteurs des consommateurs. « *Faire du recyclage à l'étranger ou consommer des produits issus de l'agriculture biologique étrangère ne sont pas des actions vertueuses puisqu'elles impliquent énormément de temps de transport et donc d'émissions de gaz à effet de serre* », affirme le chercheur. Bien plus qu'une simple proximité géographique, une proximité relationnelle entre les différents acteurs locaux s'avère cruciale. « *Des entreprises voisines doivent avoir des productions compatibles afin de recycler leurs déchets et de réutiliser leur énergie au niveau local.* »

En misant sur l'économie circulaire, les entreprises ne sont pas les seules à en profiter. Car en ouvrant un marché inédit dans la filière du recyclage, l'économie circulaire contribue à créer des emplois sur l'ensemble du territoire. Alors pourquoi ne s'est-elle pas encore généralisée ? Aujourd'hui, l'obstacle principal n'est autre que financier. Mis à part quelques secteurs ayant déjà opéré cette transition, comme l'alimentation avec les circuits courts, les unités de méthanisation ou les réseaux de chaleur, la plupart des entreprises ont du mal à changer leurs procédés de production. Cela s'explique notamment par leurs difficultés à évaluer et à estimer leurs bénéfices. Face à ce constat, un investissement de l'État est nécessaire, afin de les accompagner dans leur transition en proposant des incitations financières et des méthodes d'évaluations simples et rapides d'investissements durables.

### Renforcer la circularité industrielle : l'agriculture urbaine à l'étude



À l'Université Paris-Saclay, plusieurs scientifiques s'attachent à accompagner les entreprises dans leur démarche de responsabilité durable. Ils développent des outils d'analyses simplifiées afin de les aider à optimiser la circularité de leurs procédés industriels et à réduire leur empreinte carbone.

Plusieurs stratégies durables et réalisables à l'échelle industrielle sont d'ailleurs actuellement envisagées conjointement avec divers secteurs industriels.

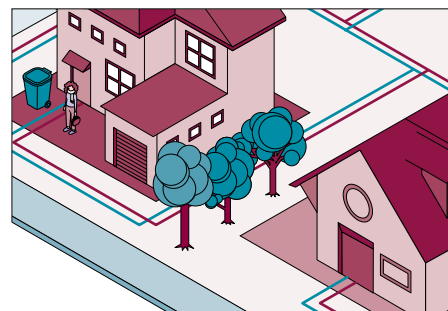
En collaboration avec une ferme de champignons installée dans le département des Yvelines (78), Christine Aubry et Erica Dorr, spécialistes de l'agriculture urbaine au laboratoire SADAPT, ont élaboré des stratégies pour limiter les impacts environnementaux de cette production. « *En France, l'agriculture urbaine se développe depuis une dizaine d'années. Elle représente une opportunité pour l'économie circulaire en revalorisant localement les déchets urbains*, expliquent de concert les deux chercheuses. *La dimension locale limite les déplacements et facilite les échanges entre producteurs et consommateurs.* »

Déjà bien développée, cette ferme de champignons génère une économie doublement circulaire : d'un côté, le marc de café est revalorisé en substrat pour la culture de *Pleurotus ostreatus* (ou pleurote en forme d'huître), et d'un autre, le compost de champignons est réutilisé par les agriculteurs de la région Île-de-France pour créer des fertilisants et engrais. Bien que cette économie soit d'ores et déjà robuste, les agriculteurs souhaitent continuer à minimiser leurs émissions qui s'élèvent actuellement à 3 kg d'équivalent CO<sub>2</sub> par kilogramme de champignons. En modélisant différents scénarios, les chercheuses ont identifié deux stratégies réduisant 45 % des impacts environnementaux : il s'agit de diminuer le temps de pasteurisation du marc de café et d'améliorer les pratiques sanitaires pour maximiser le rendement.

Au-delà de la valorisation des déchets organiques urbains, ces modèles d'analyses participent également au développement d'alternatives à la consommation d'eau dans le secteur agroalimentaire. « *En revalorisant les eaux usées, on limiterait l'utilisation d'eau potable pour l'arrosage des cultures. À l'heure actuelle, le point bloquant est matériel et logistique. Mais ce sont des thématiques qui se développent de plus en plus* », déclare Christine Aubry.

Ces modèles d'analyses restent néanmoins difficiles à généraliser à l'ensemble des cultures agricoles, puisque chaque ferme possède ses propres savoir-faire et spécificités. Dans le cas de cultures en plein-air, les conditions environnementales comme l'humidité et la température ne sont d'ailleurs pas bien contrôlées et les paramètres sur lesquels jouer sont alors très variables. Il devient difficile de modéliser les flux de matières et d'évaluer précisément l'origine des impacts environnementaux.

### Le potentiel du marché automobile de seconde main



À l'inverse, le secteur automobile offre une meilleure stabilité pour le développement de modèles technico-économiques. Bernard Yannou et son équipe du Laboratoire génie industriel (LGI – Univ. Paris-Saclay, CentraleSupélec) ont eux aussi mis leur savoir au service de l'économie circulaire. En partenariat avec trois entreprises spécialisées dans la construction d'engins lourds (Manitou en France, Liebherr en Suisse et John Deere aux États-Unis), ils ont développé un modèle d'évaluation de la rentabilité d'un marché de seconde main. Car contrairement aux véhicules légers, la filière des engins lourds, qui produit une quantité massive de déchets, n'est soumise à aucune réglementation en matière de recyclage. « *Pourtant, la masse des véhicules lourds en circulation est identique à celle des véhicules légers* », s'étonne Bernard Yannou.

En rachetant leurs véhicules usagés, ces entreprises deviendraient les actrices d'un marché de seconde main, capables, grâce à leur expertise, de démonter les engins et de revendre ou de réutiliser les pièces détachées. « *Avec le modèle que nous avons développé, on parvient rapidement et facilement à diagnostiquer l'état des composants, connaître leur valeur sur le marché de seconde main et estimer le temps et le coût des procédés industriels qu'implique leur réutilisation, comme le démontage, la restauration et le reconditionnement. Ensuite, on simule le comportement des consommateurs pour trouver un optimum entre circularité et profit global de l'entreprise sur ses deux marchés* », explique le chercheur.

Ce travail a également révélé l'importance de la traçabilité des biens. Les entreprises ne parviennent généralement pas à localiser leurs véhicules en fin de vie ce qui rend difficile leur récupération. C'est notamment en modélisant le recyclage du platine, un métal aussi cher que l'or et contenu dans les pots catalytiques des engins lourds, que les scientifiques du LGI ont constaté un exode du matériau. « *Le platine fait partie des matériaux considérés comme critiques pour l'Union européenne. Très difficile à récupérer, il se raréfie et son prix augmente.*



Selon notre étude, environ 25 % des pertes sont dues à une migration des pots catalytiques en dehors de l'Europe», explique Bernard Yannou. Au moyen d'une simulation à modèles multiples, l'équipe du LGI a montré que la mise en place de directives économiques européennes portant sur l'écoconception et la traçabilité réduirait cette perte de moitié.

### Créer de nouveaux procédés durables : le recyclage des circuits imprimés en question

Si certains tentent d'optimiser la circularité des procédés industriels existants, d'autres scientifiques de l'Université s'attèlent à créer de nouvelles possibilités transposables à grande échelle. C'est le cas de Jean-Christophe Gabriel du laboratoire Nanosciences et innovation pour les matériaux, la biomédecine et l'énergie (NIMBE – Univ. Paris-Saclay, CEA, CNRS). En collaboration avec l'Institut de chimie séparative de Marcoule et l'Université technologique de Nanyang (Singapour), il développe des méthodes de séparation chimique pour accentuer le recyclage des déchets électroniques.

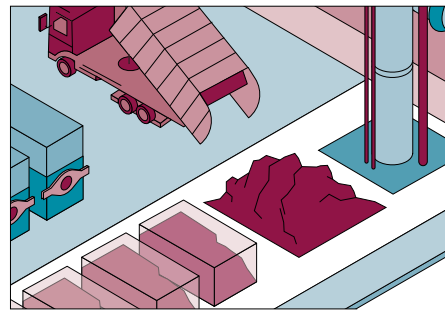
«Actuellement, seuls 30 % de la masse des circuits imprimés usagés sont recyclés», précise le chercheur. La filière traditionnelle ne recycle pour l'heure que les métaux précieux des circuits imprimés, comme l'or, l'argent et le platine, ou ceux à fort tonnage, comme le fer, le cuivre et l'aluminium. En cause : la difficile séparation des éléments chimiques, près d'une soixantaine par circuit imprimé, au moyen de processus thermiques et chimiques (extraction liquide-liquide) spécifiques à chaque métal. Pour corriger cela, l'équipe du NIMBE explore de nouvelles étapes de procédés capables de séparer finement les métaux et de récupérer les terres rares, ces métaux indispensables aux nouvelles technologies. «La difficulté est d'être économiquement viable face à la variabilité chimique des déchets», confie Jean-Christophe Gabriel.

Grâce à un tri sélectif couplé à un système microfluidique et à des analyses chimiques poussées, les scientifiques ont évalué plus de 75 étapes de procédés d'extraction liquide-liquide aux formulations différentes. «Ce système réduit les volumes et fait gagner du temps, il limite les coûts de développement et les déchets produits.» Ils sont désormais capables de trier plusieurs kilogrammes de composants électroniques par heure pour récupérer sélectivement certaines terres rares.

Comme ce système fait également appel à des solvants organiques (à l'instar des procédés traditionnels), l'équipe a élaboré une nouvelle stratégie d'extraction, basée sur du

CO<sub>2</sub> supercritique. Ce solvant, non-toxique et facilement recyclable, possède simultanément les propriétés d'un gaz, pour pénétrer les matériaux, et celles d'un liquide, pour dissoudre les composés. Il réussit à recycler à la fois les métaux et les plastiques des circuits imprimés, contaminés par des additifs toxiques tels que les colorants, les métaux lourds polluants ou les retardateurs de flamme. L'équipe a récemment extrait ces derniers avec une efficacité d'environ 40 % par cycle, une opération répétée jusqu'à atteindre la pureté souhaitée. Contrairement aux filières de recyclage des plastiques, qui échouent à retrouver toutes les capacités des polymères, ce procédé est également capable d'améliorer leur valeur sur le marché. «On réussit à purifier le plastique en éliminant les molécules n'ayant pas totalement réagi. Ainsi recyclés, certains déchets plastiques peuvent être réutilisés dans un secteur à plus forte valeur ajoutée», confie Jean-Christophe Gabriel.

### Mieux valoriser le CO<sub>2</sub>



Si la création de nouveaux procédés circulaires favorise la réduction des émissions de CO<sub>2</sub>, elle participe également au recyclage de cette molécule. La stratégie est ainsi envisagée par Thibault Cantat, chimiste au laboratoire NIMBE. «Produire des carburants ou des composés chimiques nécessite l'usage de produits carbonés. Actuellement, l'industrie chimique s'approvisionne à plus de 95 % dans les énergies fossiles, mais il serait stratégique d'utiliser des ressources renouvelables comme le CO<sub>2</sub> et la biomasse», informe le chercheur.

Avec son équipe, il étudie depuis plusieurs années différentes voies de synthèse valorisant le CO<sub>2</sub> en produisant du méthanol, un composé de grand intérêt pour l'industrie chimique. L'une des plus prometteuse s'appuie sur l'électrolyse du CO<sub>2</sub>. Mais la réaction produit également du dihydrogène, un gaz explosif et difficile à manipuler. Pour l'éviter, l'équipe a développé un procédé qui fait appel à du silicium, un composé naturellement abondant, recyclable et réutilisable à la fin de la réaction grâce à une boucle chimique. En passant par un intermédiaire, l'acide formique, le silicium favorise la formation de méthanol au

détriment du dihydrogène. Grâce à lui, l'équipe transforme plus de 75 % de l'acide formique – issu du CO<sub>2</sub> – en méthanol. «En l'optimisant, nous pourrions aisément maximiser le rendement. Appliqué à l'échelle européenne, la production de méthanol pourrait recycler 10 millions de tonnes de CO<sub>2</sub> par an», confie Thibault Cantat. Des études complémentaires sont en cours pour appliquer ce procédé à d'autres marchés économiques, comme la production d'hydrocarbures, de monomères plastiques ou de médicaments, en couplant l'acide formique à des molécules issues de la biomasse.

La transition est lancée. Qui pourra l'arrêter ?

### Publications

- E. Dorr, et al. Life cycle assessment of a circular, urban mushroom farm. *Journal of Cleaner Production*, 288, (2021).
- S. Dermine-Brullot, A. Torre. Quelle durabilité pour le développement territorial ? Réflexions sur les composantes spatiales de l'économie circulaire. *Natures Sciences Sociétés*, 28, (2), (2020).
- M. Saidani, et al. Multi-tool methodology to evaluate action levers to close the loop on critical materials – Application to precious metals used in catalytic converters. *Sustainable Production and Consumption*, 26, (2021).
- C. Chauvier, et al. Catalytic Disproportionation of Formic Acid to Methanol by using Recyclable Silylformates. *Angewandte Chemie International Edition*, 59, (2020).
- D. Xia, et al. On-line spectroscopic study of brominated flame retardant extraction in supercritical CO<sub>2</sub>. *Chemosphere*, 263, (2021).

Titre

# Du laboratoire à la start-up : la valorisation des recherches à l'Université Paris-Saclay

**Lieux de recherche, les laboratoires constituent aussi des lieux d'innovation : les travaux réalisés font souvent l'objet de transferts de technologies qui aboutissent à la création de start-up. Un parcours de (pré)maturation qui bénéficie, au sein de l'écosystème Paris-Saclay, de plusieurs outils d'aide au financement et à l'accompagnement. Tour d'horizon non exhaustif des start-up issues des laboratoires de l'Université et de quelques dispositifs utilisés.**

**LABORATOIRE D'ORIGINE / START-UP CRÉÉE(S)**

- 1 – C2N (UPSaclay, CNRS, Univ.de Paris) / CRYOHEMT, KLEARIA, QUANDELA, Spin-ION Technologies
- 2 – Centre Borelli (UPSaclay, CNRS, ENS Paris-Saclay, Univ. de Paris, SSA) / Visionairy
- 3 – CVN (UPSaclay, CentraleSupélec) / Therapanacea
- 4 – EM2C (UPSaclay, CNRS, CentraleSupélec) / Spark
- 5 – END-CIAP (UPSaclay, UVSQ, Inserm) / EG427
- 6 – GEMAC (UPSaclay, UVSQ, CNRS) / EXOTRAIL
- 7 – I2BC (UPSaclay, CEA, CNRS) / LPS BIOSCIENCES
- 8 – ICMMO (UPSaclay, CNRS) / NOVECAL
- 9 – ICP (UPSaclay, CNRS) / ALYXAN, BICHROMATICS, Teratonics

- 10 – IDMIT (UPSaclay, CEA) / Theranexus
- 11 – IGPS (UPSaclay, CNRS) / ALZOHIS, IMESCIA
- 12 – IJPB (UPSaclay, INRAE, AgroParisTech) / Seed in Tech
- 13 – Inria Saclay / Therapixel
- 14 – IPS2 (UPSaclay, CNRS, INRAE, Univ d'Évry, Univ. de Paris) / BIOPHYTECH
- 15 – ISMO (UPSaclay, CNRS) / ABBELIGHT, VitaDX
- 16 – LAMBE (UPSaclay, Univ d'Évry, CNRS, Univ. Cergy-Pontoise) / DREAMPORE

- 17 – LATMOS (UPSaclay, UVSQ, CNRS, Sorbonne Université) / HD Rain
- 18 – LBPA (UPSaclay, CNRS) / Kimialys
- 19 – LCF (UPSaclay, IOGS, CNRS) / DAMAE MEDICAL, PASQAL
- 20 – LI-PARAD (UPSaclay, UVSQ) / PEXL
- 21 – LIST (UPSaclay, CEA) / ALKALEE, TRIDIMEO, WiN MS, WISEBIM

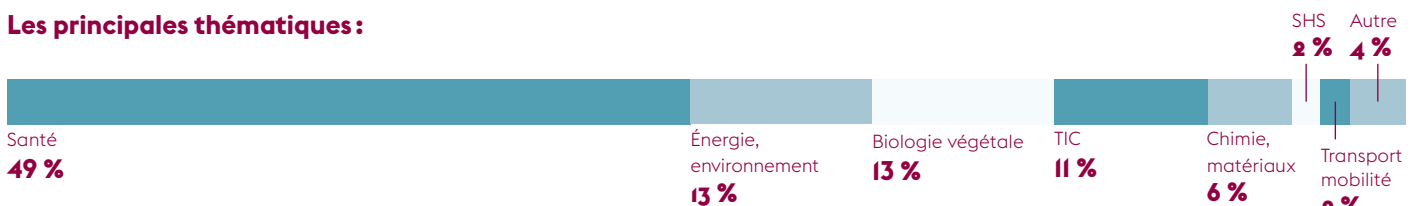
- 22 – LISV (UPSaclay, UVSQ) / OLEDCOMM
- 23 – LMF (UPSaclay, CNRS, ENS Paris-Saclay, CentraleSupélec, Inria) / Cryptosense
- 24 – LMT (UPSaclay, ENS Paris-Saclay, CNRS, Sorbonne Univ.) / EIKOSIM

- 25 – MIRCEAN (UPSaclay, CEA) / BRAINVECTIS
- 26 – NIMBE (UPSaclay, CEA, CNRS) / NAWATECHNOLOGIES
- 27 – ONERA / AERACCESS, Blue Industry and Science, MORPHEE +

- 28 – SPI (UPSaclay, INRAE, CEA) et SCBM (UPSaclay, CEA) / CERES BRAIN Therapeutics
- 29 – UMPhy (UPSaclay, CNRS, Thales) / DAUMET



**Les principales thématiques :**





## μDROPMIXER : l'innovation qui sort de l'enceinte académique

Lauréat de l'appel à projets prématuration Poc in Labs 2020 de l'Université Paris-Saclay destiné à soutenir et à financer la preuve de concept de projets innovants, μDROPMIXER est un nouveau mélangeur de microparticules pour la réalisation de micromélanges. Protégé par un brevet, il est porté par Étienne Herth, ingénieur de recherche au Centre de nanosciences et de nanotechnologies (C2N – Univ. Paris-Saclay, CNRS). Désireux d'en faire profiter l'industrie (médicale, biologique, chimique, génomique, agroalimentaire, etc.), ce dernier soumet en septembre 2020 son projet au programme pédagogique Maturaction de l'Université, qui forme les étudiants à la gestion de projets innovants et à la création de start-up *deeptech* par le biais de cas réels, et permet aux chercheurs de transformer leurs résultats de recherche en projets industriels. En parallèle, Étienne Herth participe au programme de formation Genesis Light, porté par Incuballiance et qui sensibilise les chercheurs à la création d'entreprise et leur révèle la réalité économique du projet. «*En se confrontant aux mondes socio-économiques et aux besoins industriels, je me rends compte qu'il y a de grands besoins pour des techniques innovantes et qu'il ne reste qu'à sortir des frontières du monde académique pour y répondre. Genesis Light révèle la capacité d'un projet à rencontrer son marché, et Maturaction facilite grandement ce passage.*»

<https://www.universite-paris-saclay.fr/actualites/le-programme-maturaction-une-formation-la-creation-de-start-deeptech-inedite>

## SOUND: Transformer des surfaces en haut-parleurs

Localiser et contrôler des vibrations sur tout type de surface (de l'écran de smartphone au tableau de bord d'une voiture), pour les rendre multifonctionnelles, tel est l'objectif du projet SOUND. Il est porté par Christian Bolzmacher, du Laboratoire d'intégration de systèmes et de technologies (List – Univ. Paris-Saclay, CEA) : «*Nous avons développé une technologie de filtrage inverse spatio-temporel qui transforme une surface en haut-parleur avec la possibilité de créer plusieurs sources sonores.*» Pour développer le potentiel de cette innovation, le projet bénéficie de l'appel à projets prématuration Poc in labs en 2019. Ce qui permet au chercheur de suivre le programme de formation à l'entrepreneuriat Genesis Light, de faire réaliser une étude de marché, mais aussi d'être

accompagné par le Design Spot pour développer les usages de la technologie auprès du plus grand nombre, notamment axés sur la domotique. «*Nous avons ainsi développé un démonstrateur pour mettre en valeur la fonctionnalisation de nombreux types de matériaux.*» Le démonstrateur est en cours de fabrication.

## BOSS: une solution alternative aux pesticides

Le projet BOSS (Booster of Seeds and Seedlings) est né à l'Institut Jean-Pierre Bourgin (IJPB – Univ. Paris-Saclay, INRAE, AgroParisTech). Sa technologie de «*priming*» consiste à améliorer la qualité germinative des semences, à l'aide de molécules biologiques qui stimulent leur potentialité naturelle de croissance et de résistance au stress. «*C'est un peu comme une cure de vitamines*», précise l'enseignant-chercheur et porteur du projet Loïc Rajjou. En 2015/2016, un financement de prématuration Poc in labs lui donne la possibilité de transposer le travail développé sur des plantes modèles vers des plantes cultivées. Grâce aux résultats obtenus, il devient lauréat d'un programme de maturation à la fin de 2018, financé et accompagné par la SATT Paris-Saclay. «*Nous avons ainsi été en capacité de recruter deux jeunes scientifiques, d'étendre la technologie à d'autres espèces et de la dimensionner à une échelle préindustrielle, mais aussi de déposer un brevet.*» Puis l'équipe constitue un dossier pour le concours i-Lab de BPIFrance, conseillée par Incuballiance et AgroParisTech innovation. La technologie est accessible aux acteurs de la filière semences via la start-up Seed In Tech en cours de création.

<https://satt-paris-saclay.fr/vitrine-technologique/boss/>

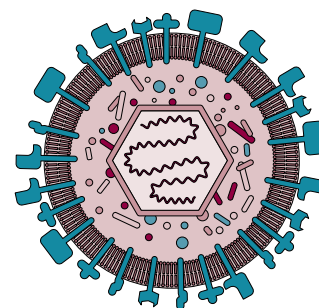
## Spark: extraire l'hydrogène du gaz sans émission de CO<sub>2</sub>

La start-up Spark développe une solution à destination des industriels consommateurs d'hydrogène. Le procédé utilise la technologie des plasmas froids pour réaliser un craquage électrique : «*Comme nous extrayons le carbone, le procédé est sans émission de CO<sub>2</sub> et consomme trois fois moins d'électricité qu'un électrolyseur*», commente Erwan Panier, docteur du laboratoire d'Énergétique moléculaire et macroscopique, combustion (EM2C – Univ. Paris-Saclay, CentraleSupélec, CNRS). Il lance le projet en 2019, notamment grâce au parcours «*Les doctor'preneuriales*» de l'Université Paris-Saclay, destiné à initier les

doctorants aux techniques entrepreneuriales spécifiques à la *deeptech*. Il se tourne ensuite vers le dispositif de financement et d'accompagnement de projets «*Jeune docteur*» de la SATT Paris-Saclay. «*J'ai pu réaliser une première preuve de concept technique et de marché, qui m'a conduit à adapter et réorienter la technologie vers les applications les plus prometteuses.*» En 2020, il bénéficie de fonds issus de l'appel à projet maturation de la SATT Paris-Saclay, grâce auxquels il renforce l'équipe R&D pour réussir le passage à l'échelle de la technologie et produire de l'hydrogène directement sur site.

<http://spark-cleantech.eu/>

## EG427: la thérapie génique au service des troubles mictionnels

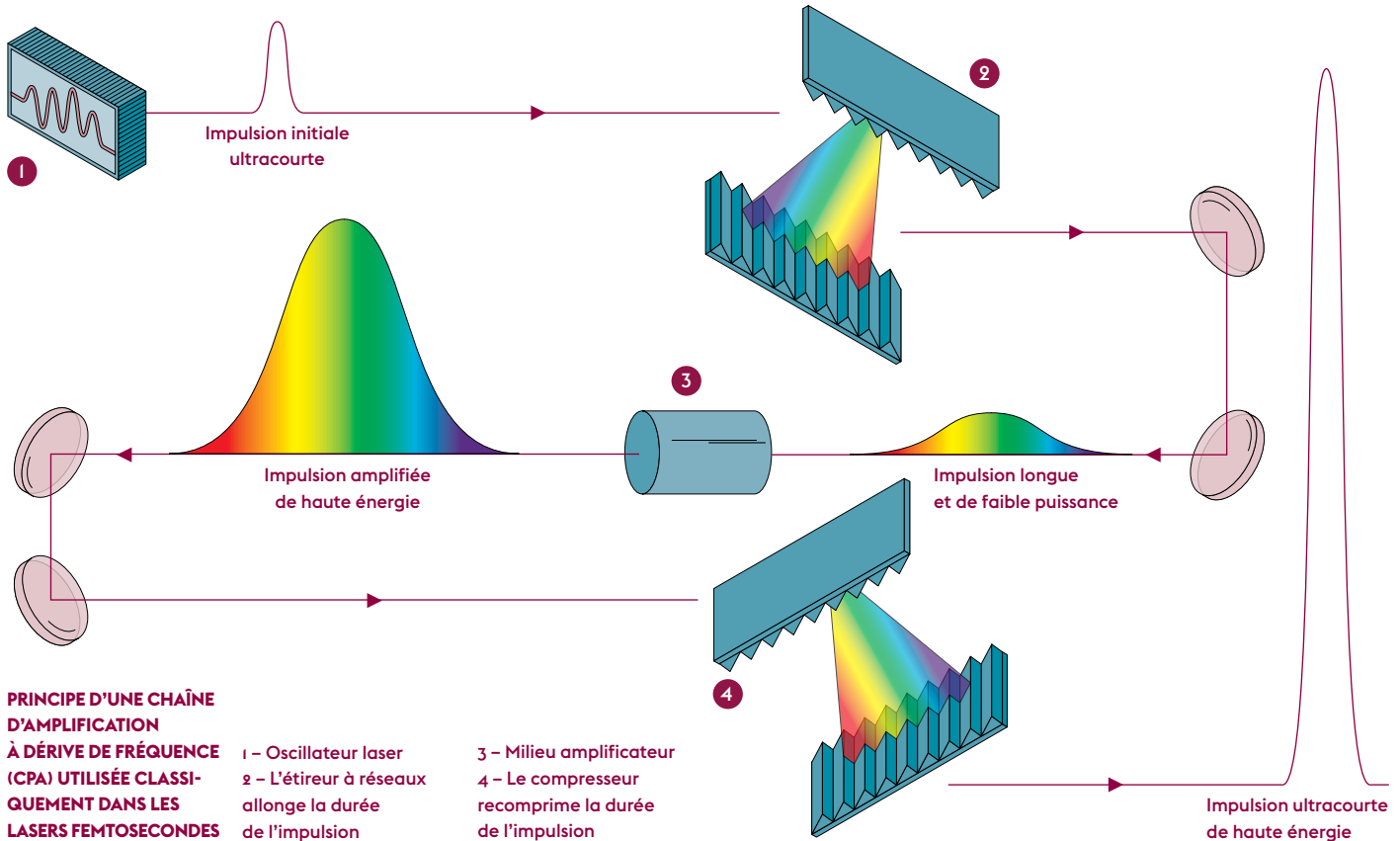


La start-up EG427 (anciennement Genelpis) développe un traitement pour les pathologies neurologiques, pour résoudre les dysfonctionnements de la vessie liés à des lésions médullaires. Sa technologie, une plateforme de thérapie génique basée sur l'utilisation de vecteurs défectifs dérivés du virus de l'herpès simplex (HSV-1), empêche les contractions anormales de la vessie. Elle est issue des travaux de recherche de François Giuliano, Pierre Denys et Alberto Epstein du laboratoire Handicap neuromusculaire : physiopathologie, biothérapie et pharmacologie appliquées (END-ICAP – Univ. Paris-Saclay, UVSQ, Inserm) et l'AP-HP. L'équipe a bénéficié d'un accompagnement important via le programme européen ERANET Neuron pendant sa phase de développement, puis, à partir de 2016, d'un programme de maturation de la SATT Paris-Saclay. Cela lui a donné la possibilité de conduire des études précliniques, d'obtenir une preuve de concept et de déposer un brevet. «*Après le transfert de la technologie à la start-up en 2019, et suite à une nouvelle série d'études, nous avons réalisé une levée de fonds de 12 millions d'euros en janvier 2021 pour continuer sur cette très belle lancée*», commente Philippe Chambon, directeur général d'EG427.

<https://www.eg427.com/s>

Titre

# Quand la lumière se fait brève mais intense



**Avec les lasers femtosecondes, aux impulsions ultracourtes et à la puissance sans cesse repoussées, les scientifiques de l'Université Paris-Saclay éclairent les phénomènes et domaines d'application de ces dispositifs au rayonnement si particulier.**

Rares sont les inventions à la destinée aussi éclatante que celle du laser. Énoncé sur le principe dès 1917 par Albert Einstein, le premier dispositif à rayonnement amplifié, monochromatique et cohérent apparaît en 1960, grâce aux travaux du physicien américain Theodore Maiman. Depuis, le dispositif s'est largement popularisé et a connu bien des améliorations, devenant indispensable dans des domaines aussi variés que la médecine, les télécommunications, l'imagerie, le micro-usinage. De nouveaux types de lasers ont fait surface. Largeur spectrale d'émission, durée et cadence des impulsions, énergie, puissance et densité de puissance délivrées..., leurs caractéristiques ouvrent des perspectives inédites.

En ligne de mire : la génération d'impulsions ultrabrèves à très haute intensité, compatibles

avec de nouvelles applications et l'étude de phénomènes biologiques, physiques ou chimiques se déroulant à des échelles de temps extrêmement courtes, comme ceux explorés par les chercheurs et chercheuses de l'Université Paris-Saclay. Popularisés dès les années 90 par leur application en chirurgie ophtalmique, les lasers femtosecondes en constituent la tête de proue. Aujourd'hui, ils délivrent en routine des impulsions d'une dizaine à quelques centaines de femtosecondes (fs,  $10^{-15}$  s), d'une puissance atteignant le térawatt (TW,  $10^{12}$  W) voire le pétawatt (PW,  $10^{15}$  W).

### Une chaîne d'amplification laser des plus performantes

Au sein du Laboratoire interactions, dynamiques et lasers (LIDYL – Univ. Paris-Saclay, CEA, CNRS), plusieurs lasers femtosecondes sont à la disposition des utilisateurs. Parmi eux, ceux de l'équipement d'excellence ATTO-LAB produisent en routine des impulsions parfaitement contrôlées de 15 mJ, à haute cadence et d'une durée d'environ 23 fs. Une durée qui descend à 17 fs en optimisant les réglages.

« La spécificité de la plateforme ATTO-LAB Orme coordonnée par le LIDYL est de proposer une chaîne d'amplification laser (FAB 1-10) à

double cadence (1 et 10 KHz) émettant dans l'infrarouge, et des sources secondaires attosecondes (as,  $10^{-18}$  s) émettant dans le domaine extrême XUV », relate Jean-François Hergott de l'équipe Support et lasers à impulsions courtes (SLIC). FAB 1-10 est le résultat d'un travail initié il y a plus de dix ans avec la société Amplitudes Technologies dans le cadre du laboratoire commun Impulse. « Toute la chaîne d'amplification a été étudiée pour gagner en stabilité. L'environnement du laser a été amélioré et les locaux réhabilités. » L'équipe s'est notamment attachée à stabiliser la première étape de la chaîne grâce à une cavité régénérative plus performante et compatible avec de plus hautes cadences, causes de charges thermiques plus fortes. Additionné à un filtre acousto-optique réglable, l'ensemble améliore le rendement optique et délivre en sortie trois fois plus d'énergie qu'un schéma « classique ». Un autre développement a porté sur le contrôle précis de la position du champ d'oscillation dans l'enveloppe temporelle de l'impulsion amplifiée.

Aujourd'hui, l'équipe continue de réduire la durée des impulsions. « On a mis au point un système de post-compression à haute énergie, une étape intermédiaire entre la sortie du laser et la génération d'un rayonnement XUV. Dans une

fibres optiques creuses étirées sous vide, on couple l'impulsion laser avec du gaz. On obtient, après interaction non linéaire, des impulsions de 3,9 fs et de 2,5 mJ. » En couplant ces impulsions aux stations XUV de la plateforme, l'équipe souhaite générer des impulsions attosecondes uniques, avec lesquelles étudier et contrôler les dynamiques électroniques dans la matière.

### Observer des objets nanométriques aux temps attosecondes

Ce régime dit de champ fort est au cœur des recherches menées au LIDYL par Hamed Merdji et Willem Boutu. Motivés pas la compréhension de phénomènes ultrarapides à des échelles nanométriques, ils s'intéressent particulièrement à une nouvelle thématique : l'électronique pétahertz. « En électronique, les processeurs actuels fonctionnent à des fréquences de l'ordre du gigahertz (GHz,  $10^6$  Hz). Or le domaine pétahertz (PHz,  $10^{15}$  Hz) permettrait de répondre à de nouvelles problématiques de calcul ou de stockage d'informations. Cela suppose de nouvelles méthodes pour suivre le mouvement des électrons dans les semi-conducteurs aux échelles nanométrique et attoseconde », souligne Hamed Merdji.

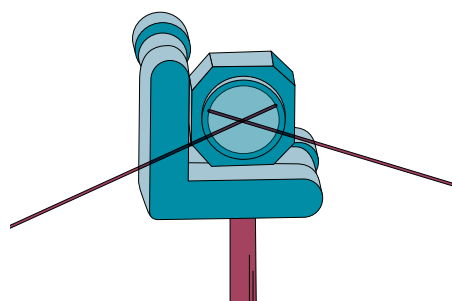
Les physiciens comptent notamment sur l'imagerie par diffraction cohérente (CDI), qui consiste à éclairer un objet avec une lumière cohérente pour recueillir la figure de diffraction générée et reconstruire, au moyen d'algorithmes d'inversion, la phase encodée sur l'hologramme, puis l'image de l'objet. « Le principe est similaire à ce qu'on observe avec la lumière du soleil lorsqu'elle passe à travers le trou d'une feuille d'arbre. Les rayons lumineux sont diffractés et se dirigent dans plusieurs directions en s'élargissant. Or l'angle qu'ils prennent véhicule des informations concernant la taille du trou. Plus le trou est petit, plus l'angle de diffraction est important. Avec une caméra, on enregistre l'image du passage de la lumière et en utilisant de la lumière cohérente, on encode la phase du rayonnement qui véhicule les informations spatiales de l'objet. »

Dans les travaux réalisés, la CDI fait appel à un rayonnement cohérent XUV ou X ultracourt. « Si on veut observer des objets nanométriques, il faut des sources de rayonnement de longueur d'onde nanométrique. » Mais dans le cas d'impulsions attosecondes, le spectre de ces sources XUV, extrêmement large, brouille l'image de diffraction obtenue en CDI. « Chacune de ses longueurs d'onde produit une image de diffraction et toutes se superposent de manière incohérente. L'information encodée est alors perdue. »

Pour les « désintriquer », l'équipe a développé un algorithme original qui utilise un système

d'inversion basé sur des projections mathématiques du spectre. La fonction de « défloutage » obtenue produit une figure de diffraction moyenne analysable par les algorithmes de reconstruction CDI. L'équipe a validé sa méthode avec les rayons X cohérents de la ligne NANOSCOPIUM du synchrotron SOLEIL. « On a reconstruit expérimentalement le contenu spectral théorique d'une impulsion attoseconde. » Prochainement, elle prévoit d'appliquer l'outil mathématique à un système associant une source attoseconde réelle.

### Fonctionnaliser les matériaux transparents



À l'Institut de chimie moléculaire et des matériaux d'Orsay (ICMMO – Univ. Paris-Saclay, CNRS), l'équipe dirigée par Bertrand Pommellec et Matthieu Lancry promeut l'utilisation des lasers femtosecondes en tant qu'outil unique pour modifier en profondeur les matériaux transparents (verre, fibre optique, film, substrat massif ou vitreux, polymère, cristal) et y implémenter, quelles que soient leur forme et leur composition, toute une série de fonctions (micromécaniques, optiques, microfluidiques...). Une fois fonctionnalisés, les objets deviennent sensibles à l'environnement et sont utilisés en tant que capteurs de température, de pression, de déformation, de concentration... « Le laser vient réduire le nombre de méthodes de fabrication. Il évite les assemblages et les collages, minimise les erreurs et améliore la durée de vie des objets », explique Matthieu Lancry.

« Toute matière, même transparente, est sensible à l'intensité lumineuse », rappelle le chercheur. Avec des impulsions de 0,1  $\mu$ J à quelques  $\mu$ J et de l'ordre du TW/cm<sup>2</sup>, le rayonnement ne passe plus au travers du substrat mais est absorbé sur un volume de quelques  $\mu$ m<sup>3</sup>. Avec lui, la matière change localement de densité et d'indice de réfraction. « La lumière, c'est un peu comme une main qui, sans contact, parvient à sculpter la matière », analyse Bertrand Pommellec.

Tout se joue à l'interface entre le faisceau lumineux et le plasma de matière créé. S'y produisent des transformations de phase, comme la for-

mation de nanobulles (ou nanopores) d'une dizaine de nanomètres de diamètre, ou la création de nanoréseaux. Alors que les changements de densité sont peu stables thermiquement, les modifications d'indice de réfraction résistent à de très hautes températures. « Ça donne accès à des environnements extrêmes, tels que les centrales nucléaires de future génération, les moteurs d'avion, les lieux de forage de gaz... », détaille Matthieu Lancry.

Contrôler la taille de toutes ces modifications s'avère primordial. « Par exemple, si les nanopores sont trop gros, le signal se diffuse à l'excès et est perdu. » Apprécies des composants optiques, les petits pores, qui entraînent moins de pertes optiques et de diffusion, sont aussi moins stables thermiquement. En jouant sur les paramètres laser, les chercheurs parviennent à ajuster leur taille. « On joue sur la vitesse d'écriture et le taux de répétition du laser pour accumuler plus ou moins de chaleur dans le matériau. » Tout l'enjeu est de mieux comprendre les mécanismes d'écriture et d'effacement, pour stabiliser les composants dans leurs futures conditions d'utilisation. « Il est important pour les industriels d'avoir des composants qui ne dérivent pas et restent fiables toute leur vie. »

Ces dernières années, une nouvelle étape a été franchie grâce à un modèle développé au laboratoire, qui prédit la cinétique d'effacement des nanopores en fonction de leur taille et de la composition chimique du matériau. Une expertise qui place l'équipe de l'ICMMO en bonne position pour proposer de nouvelles « recettes » de matériaux et obtenir des capteurs encore plus stables thermiquement. Les compositions se concentrent sur des mélanges à 95 % d'oxyde de silice (SiO<sub>2</sub>) et 5 % d'oxyde de germanium (GeO<sub>2</sub>), de SiO<sub>2</sub> et d'oxyde d'aluminium (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), ou de SiO<sub>2</sub> et d'oxyde de zirconium (ZrO<sub>2</sub>). « On commence à voir un effet pour des mélanges à plus de 30 % d'Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. »

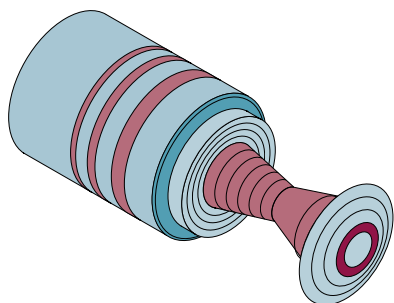
Pour l'heure, l'équipe finalise un modèle prédisant la formation des nanopores, et développe de nouvelles fibres optiques à partir de compositions vitreuses, semi-cristallines et vitrocéramiques, pour des régimes de température supérieurs à 1 500 °C.

### Des ondes térahertz pour la spectroscopie à distance

Au Laboratoire matière sous conditions extrêmes (LMCE – Univ. Paris-Saclay, CEA), Luc Bergé, Laurent Gremillet et leurs collègues s'intéressent à la génération d'ondes électromagnétiques térahertz (THz) par laser femtoseconde. Au moyen de simulations numériques particulières (PIC), l'équipe reproduit de façon spéculative les paramètres physiques



d'expériences d'irradiation de cibles pour améliorer le rendement de conversion de l'impulsion laser en rayonnement THz, et obtenir la source THz la plus énergétique possible. Tout l'enjeu est de réussir à discriminer les différentes sources d'émission THz.



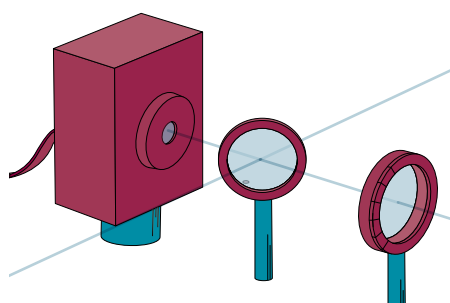
À des intensités supérieures à  $10^{14}$  W/cm<sup>2</sup>, les impulsions laser ionisent quasi instantanément les molécules de la cible irradiée, la transformant en plasma et induisant des courants électroniques de basse fréquence. Ces photocourants sont des sources d'émission THz d'autant plus efficaces que les oscillations du champ électrique laser utilisé sont asymétriques. Un objectif que les chercheurs atteignent en employant des impulsions laser à plusieurs couleurs. Quand l'intensité laser dépasse  $10^{18}$  W/cm<sup>2</sup>, une fraction des électrons de la cible sont accélérés à des vitesses proches de la lumière et un nouveau régime d'interaction, relativiste, se met en place. Ces électrons sont à l'origine de nombreux processus radiatifs, dont le rayonnement cohérent de transition émis lorsque les électrons traversent l'interface entre la cible et le vide.

Ces mécanismes d'accélération électronique et les processus d'émission THz associés dépendent de la nature de la cible. Si elle est transparente, comme un gaz de basse densité, le laser se propage en volume et l'accélération des électrons, jusqu'à des énergies de l'ordre du GeV, se produit de manière indirecte. « L'impulsion laser ionise le gaz et à l'arrière se développe une onde plasma dans laquelle les électrons sont accélérés. Lorsqu'ils s'échappent du plasma, on a un rayonnement à l'interface », explique Laurent Gremillet. Si la cible est solide, « le laser est réfléchi et tout se passe à la surface ». Les électrons atteignent des énergies moins élevées, de l'ordre de quelques MeV, mais leur nombre est plus important. Ces deux configurations conduisent néanmoins à un intense rayonnement de transition dans le domaine THz.

Jusqu'à récemment, l'émission THz trouvait des applications en spectroscopie et dans la caractérisation de matériaux. Mais de nouveaux besoins émergent, en chimie sélective, tomographie ou médecine. D'autres appa-

raissent en spectroscopie éloignée. Le projet ALTESSE, démarré en 2015 en collaboration avec l'Institut franco-allemand de recherches de Saint-Louis et le Centre lasers intenses et applications, devait ainsi prouver la faisabilité d'une spectroscopie THz cohérente d'échantillons à distance. « Le pari était de réussir à contrôler la manière dont des lasers ultrabrefs à deux couleurs arrachent les électrons et à générer un rayonnement THz suffisamment intense pour atteindre le matériau à analyser à travers l'atmosphère, où les molécules d'eau absorbent ces ondes », détaille Luc Bergé. L'équipe est parvenue à collecter, en un seul tir laser, de nombreuses signatures spectrales à une distance de 15 m et à caractériser par spectroscopie une vingtaine d'échantillons en poudre (acides aminés, sucres, explosifs, médicaments). La suite, ALTESSE 2, qui s'achèvera en 2023, s'intéresse au processus de filamentation laser femtoseconde, un phénomène optique non linéaire grâce auquel le faisceau laser, couplé à un canal plasma, se propage de façon autofocalisée sur une grande distance. L'équipe prévoit aussi d'étudier de nouveaux systèmes de détection et de proposer à l'Agence de l'innovation de défense (AID) un démonstrateur performant à base de verre pour détecter des explosifs à plus de 20 m.

### La photoinjection de nanoparticules



En collaboration avec des collègues du Nara Institute of Science and Technology (NAIST) au Japon, du laboratoire Photophysique et photochimie supramoléculaires et macromoléculaires (PPSM – Univ. Paris-Saclay, ENS Paris-Saclay, CNRS) et de l'Institut Galien Paris-Saclay (IGPS – Univ. Paris-Saclay, CNRS), Rachel Méallet-Renault, de l'Institut des sciences moléculaires d'Orsay (ISMO – Univ. Paris-Saclay, CNRS), a mené des expériences de photoinjection de nanoparticules luminescentes – ornées d'un chromophore de la famille des BODIPY – dans des cellules végétales vivantes. Les scientifiques ont étudié les effets d'une impulsion laser femtoseconde de 20 nJ ciblée sur la membrane cellulaire. « Le laser femtoseconde engendre la photoporation : l'énergie déposée induit un échauffement

local et une bulle de cavitation, qui déforme la membrane et fait entrer les nanoparticules dans la cellule. »

Grâce à l'imagerie à fluorescence couplée à la vidéomicroscopie rapide, l'équipe a suivi en temps réel la pénétration puis la diffusion des nanoparticules dans les cellules. Une pénétration qui s'observe également lorsque l'irradiation laser cible une région proche de la cellule. Si un seuil bas d'intensité laser et une taille limite des nanoparticules sont nécessaires pour les faire entrer dans la cellule, l'équipe n'a pas observé d'effet d'un changement de la durée de l'impulsion sur la diffusion.

« On a remarqué que des nanoparticules se retrouvent également dans les cellules voisines de celle irradiée. Cela ouvre des perspectives dans les interactions cellule à cellule : en suivant le parcours des nanoparticules, on obtiendrait des informations sur la viscosité de la cellule et ses éventuels changements métaboliques. » La chercheuse envisage désormais de transposer la technique aux bactéries, « en remplacement de l'électroporation fréquemment utilisée mais très dommageable pour ces cellules en présence de nanoparticules ».

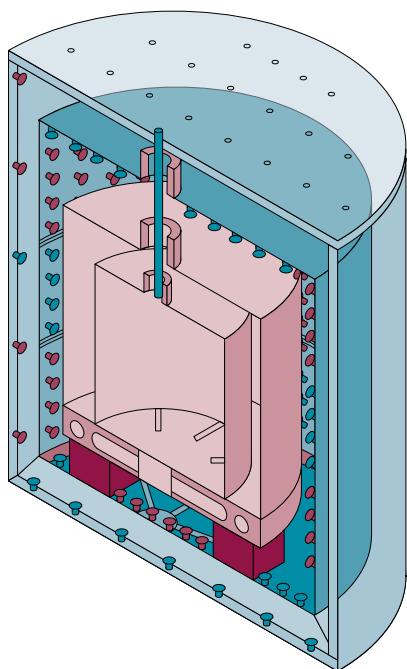
Alors, convaincus par l'éclat des lasers ?

### Publications

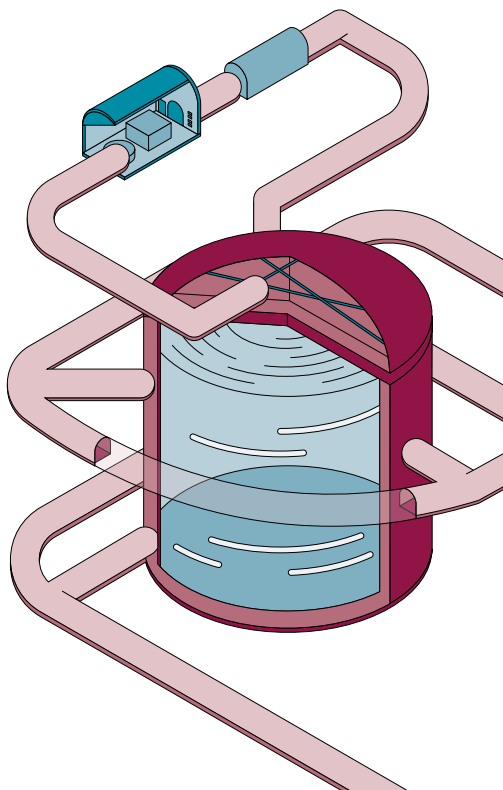
- A. Golinelli, et al. CEP-stabilized, sub-18 fs, 10 kHz and TW-class 1 kHz dual output Ti:Sa laser with wavelength tunability option. *Opt. Express* 27, (2019).
- Huijts, J., et al. Broadband coherent diffractive imaging. *Nat. Photonics* 14, (2020).
- Y. Wang, et al. Thermal stability of type ii modifications inscribed by femtosecond laser in a fiber drawn from a 3D printed preform. *Appl. Sci.* 11(2), 600, (2021).
- J. Déchard et al., Terahertz emission from submicron solid targets irradiated by ultraintense femtosecond laser pulses. *Phys. Plasmas* 27, 093105 (2020).
- T.I. Rukmana, et al. Direct observation of nanoparticle diffusion in cytoplasm of single plant cells realized by photoinjection with femtosecond laser amplifier. *Appl. Phys. Express* 13, (2020).

Titre

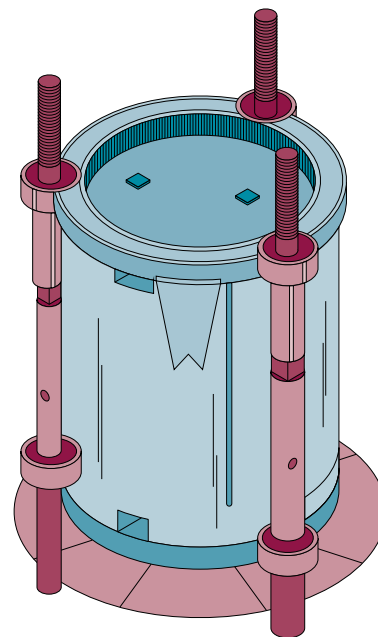
# Le neutrino : vers la physique et au-delà



**DOUBLE CHOOZ**  
Détecteur proche



**HYPER-KAMIOKANDE**  
Détecteur lointain



**CUPID**  
Bolomètre scintillant

**À la faveur d'expériences de grande envergure, les physiciens et les physiciennes de l'Université Paris-Saclay s'appliquent à lever les mystères qui entourent le neutrino et se projettent vers un nouveau modèle de physique des particules.**

Élaboré au milieu des années 1970 et enrichi depuis, le modèle standard est la pièce maîtresse utilisée en physique des particules pour expliquer les phénomènes observables à cette échelle et comprendre la structure de la matière. S'appuyant sur des découvertes opérées depuis plus d'une centaine d'années, ce modèle théorique organise et décrit les briques élémentaires (fermions) qui constituent la matière, et les modes d'interaction fondamentale qui les gouvernent. Il distingue douze fermions - six quarks et six leptons et leurs antiparticules de même masse mais de charge opposée -, répartis en trois familles, et des bosons qui orchestrent trois des quatre forces fondamentales de l'Univers – forte, faible et électromagnétique.

Si la majorité des résultats expérimentaux coïncide toujours avec ses principes

théoriques, certaines imperfections se font patentes. Et depuis plusieurs années, les chercheurs et les chercheuses se sont lancées à la poursuite d'une nouvelle physique, au-delà du modèle standard. Dans leur quête, ils s'intéressent au neutrino, un lepton élémentaire encore très énigmatique mais dont la connaissance améliorée promet de révolutionner la perception de l'Univers.

De charge neutre et d'une masse au moins 465 000 fois inférieure à celle de l'électron, le neutrino fascine par sa singularité fantomatique : il interagit très peu avec la matière, un million de milliards de fois moins que l'électron, et uniquement par la force faible. Ce qui explique qu'il soit longtemps resté sous les radars. Générés massivement au cœur du Soleil, lors de cataclysmes cosmiques ou par les rayons cosmiques de l'atmosphère, les neutrinos voyagent sans faire de vague et chaque seconde, 65 milliards d'entre eux traversent chaque cm<sup>2</sup> de la Terre et ses habitants, tel un passe-muraille.

### Des neutrinos aux trois saveurs

Envisagée dès 1930 par les physiciens Wolfgang Pauli et James Chadwick, leur existence est prouvée en 1956 par les Américains Frederick Reines et Clyde Cowan qui pour la première

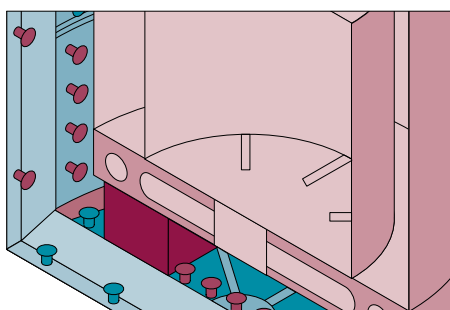
fois les observent dans le rayonnement émis par un réacteur nucléaire : lors de la fission nucléaire, un noyau d'uranium se casse en deux plus petits noyaux, instables, qui retournent à la stabilité par l'émission de photons – c'est la radioactivité gamma – ou d'électrons et de neutrinos – c'est la désintégration bêta ( $\beta$ ) avec émission de neutrinos. « Il s'agit ici d'antineutrinos, les antiparticules des neutrinos, de type, ou saveur, électronique car émis avec leur lepton partenaire, l'électron », explique Matthieu Vivier, chercheur au Département de physique des particules (DPhP – Univ. Paris-Saclay, CEA) de l'Institut de recherche sur les lois fondamentales de l'Univers (Irfu).

Avec les protons et les neutrons – des trios de quarks up et down – et les électrons, les neutrinos électroniques constituent la première famille de fermions. En 1962, puis en 2001, des observations expérimentales révèlent deux autres saveurs de neutrinos qui viennent enrichir deux autres familles de fermions : le neutrino muonique, compagnon du muon, et le neutrino tauique, celui du tau. Une saveur de neutrino correspond en fait à une superposition de trois états de masse notés 1, 2 et 3.

Mais plus étonnant, le neutrino est capable de changer de saveur au cours de sa propagation.

Un phénomène appelé oscillation des neutrinos et qui « repose sur la hiérarchie des états de masse, qui ne se propagent pas à la même vitesse, et sur les angles de mélange  $\Theta_{12}$ ,  $\Theta_{23}$ ,  $\Theta_{13}$ , qui gouvernent la probabilité d'un neutrino de changer de saveur », détaille Fabien Cavalier, chercheur au Laboratoire de physique des deux infinis – Irène Joliot-Curie (IJCLab – Univ. Paris-Saclay, CNRS, Univ. de Paris). Cette oscillation est le point de mire de nombreuses expériences internationales.

### L'oscillation sous l'angle des réacteurs



Pour son étude, les réacteurs nucléaires constituent un médium de choix. Le taux de fission y est tel qu'un réacteur produit chaque seconde entre  $10^{20}$  et  $10^{21}$  antineutrinos électroniques. De quoi espérer « quelques » interactions avec la matière environnante. Pour les détecter, les scientifiques font appel à la désintégration  $\beta$  inverse. « Il s'agit de la capture d'un antineutrino électronique par un proton. Cela produit un neutron et un positron, l'antiparticule de l'électron. Si lors de l'expérience on détecte deux signaux concomitants caractéristiques de ces deux particules, cela signe la réaction et la distingue du bruit de fond ambiant dû à la radioactivité naturelle et au rayonnement cosmique », explique Matthieu Vivier.

C'est le principe exploité par l'expérience Double Chooz, installée dès 2006 à la centrale de Chooz dans les Ardennes (France) et qui a récemment délivrée ses derniers résultats avant son démantèlement. Double Chooz a été conçue pour mesurer précisément le mode d'oscillation associé au paramètre  $\Theta_{13}$ , qui traduit un déficit d'antineutrinos électroniques, devenus muoniques ou tauïques à une certaine distance. « Dans le cas d'antineutrinos de réacteurs, dont les énergies atteignent le MeV, ce mode d'oscillation se développe à environ 1 km », commente Matthieu Vivier qui a travaillé sur Double Chooz. Situé à 400 m du réacteur dans une cavité souterraine, un premier détecteur mesurait le nombre d'antineutrinos électroniques émis et un second détecteur, à 1 500 m, ceux encore présents plus loin. « Au final, environ 5 % des neutrinos changent de saveur. » À l'intérieur des détecteurs, des cuves transpa-

rentes remplies de liquide scintillant (une sorte d'huile minérale) riche en protons et additionné d'un composé chimique se chargeaient de récupérer le signal. « Lorsqu'un neutrino traverse le liquide, il est capturé par un des protons présents, et le neutron et le positron alors émis déposent leur énergie dans le liquide qui la réémet sous forme de lumière de scintillation », signale Matthieu Vivier. À Double Chooz, près de 400 photomultiplicateurs immergés enregistraient puis traduisaient cette lumière en signaux électroniques interprétables par les scientifiques. Ceux-ci ont réussi à mesurer l'angle de mélange  $\Theta_{13}$  avec une précision de l'ordre de 10 % et montrer qu'il n'est pas nul.

« Avec Double Chooz, on a également revu les calculs de prédiction des flux de neutrinos et on s'est aperçu que de précédentes expériences avaient observé, à très courte distance des réacteurs, des taux de neutrinos inférieurs aux prédictions », rapporte Matthieu Vivier. Une anomalie à l'origine d'un postulat : l'existence d'un nouveau mode d'oscillation et d'un quatrième type de neutrino dit stérile car non-réactif. Une hypothèse récemment balayée par les résultats de l'expérience STEREO menée à quelques dizaines de mètres du réacteur de l'Institut Laue Langevin à Grenoble. Fonctionnant selon le même principe que Double Chooz, le détecteur est en passe d'exclure l'existence d'un neutrino stérile, « avec un bon indice de confiance ». « Pour expliquer cette anomalie, il faudrait plutôt aller chercher du côté des modèles théoriques et vérifier s'il n'y a pas de biais de calcul dans l'estimation des flux de neutrinos émis par les réacteurs », estime Matthieu Vivier.

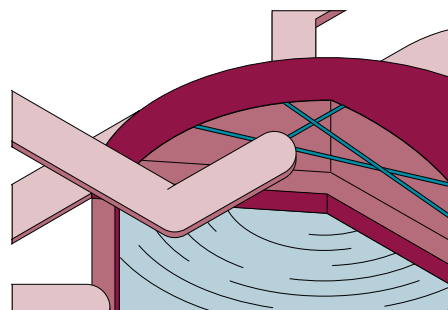
### Des détecteurs aux technologies inédites

Pour l'heure, avec ses collègues, il participe à la conception d'une nouvelle expérience, Nucleus, qui prendra place à Chooz, à 50-100 m des réacteurs. Elle a pour but d'étudier un autre processus d'interaction des neutrinos : la diffusion cohérente. Avec une probabilité d'occurrence presque mille fois plus grande que la désintégration  $\beta$  inverse, elle ouvrirait l'exploration de régimes d'énergie très bas, de 10 à 100 eV. « Nucleus ne fait pas appel aux mêmes techniques de détection – il n'y a pas de liquide scintillant – car les énergies en jeu sont bien trop faibles. » L'expérience utilise des détecteurs bolométriques composés de cristaux de saphir et de calcium tungstate, refroidis par cryostat. « Lorsqu'un antineutrino tape sur un noyau du cristal, celui-ci recule sous le « choc » et une fraction de l'énergie est déposée dans le cristal, qui la réémet sous forme de chaleur. » L'infime augmentation de température est alors mesurée par un thermomètre ultrasensible. « Il s'agit d'un film de tungstène

placé à une température de transition entre un régime normal et supraconducteur. La mesure d'une variation de tension aux bornes du thermomètre signe un dépôt d'énergie dans le détecteur. » L'équipe espère également diminuer la taille des détecteurs. Celui de Nucleus totalisera 10 g. Une vraie percée technologique.

Toujours à Chooz, l'IJCLab prévoit d'installer un nouveau concept de détecteurs de neutrinos. Avec le projet LiquidO, développé par Anatael Cabrera et ses collègues, l'idée est de se passer de liquide scintillant transparent au profit d'un liquide scintillant opaque. « On remplit le détecteur de fibres optiques très serrées qui récupèrent les photons de lumière émis. Les premiers résultats sont très concluants et un prototype est en cours », avance Fabien Cavalier.

### L'asymétrie matière/antimatière en question



Les équipes d'IJCLab et de l'Irfu sont également très impliquées dans la prochaine génération d'expériences de mesure des oscillations des neutrinos produits par accélérateur de particules : DUNE aux États-Unis et Hyper-Kamiokande, grande sœur de l'expérience T2K menée actuellement au Japon. Ces expériences s'intéressent à une autre grande faille du modèle standard : l'asymétrie matière/antimatière de l'Univers. « L'hypothèse largement répandue est que lors du Big Bang, autant de matière et d'antimatière ont été créées. Tout aurait donc dû s'annihiler mutuellement. Dans ce cas, comment expliquer qu'il reste autant de matière dans l'Univers et que toute l'antimatière ait disparu ? », enchaîne Sandrine Emery-Schrenk, chercheuse au DPhP.

Un paradoxe qui pousse les équipes à analyser et comparer le comportement des particules et des antiparticules, et à aborder un autre grand paradigme : la symétrie CPT. Cette conjugaison de trois composantes – charge (C), parité (P), temps (T) – décrit mathématiquement les comportements de la matière et de l'antimatière. « Il s'agit d'un théorème fort en physique des particules. Il dit que si on inversait la charge et la parité, une antiparticule qui remonte le temps se comporterait comme une particule qui le descend. Mathématiquement,



les comportements devraient suivre les mêmes équations », explique Fabien Cavalier. Établie pour les quarks, la violation de la symétrie CP ne suffit pourtant pas à expliquer l'asymétrie matière/antimatière, et DUNE et Hyper-Kamiokande devront apporter la confirmation de l'existence d'une violation de la symétrie CP pour les neutrinos, largement suspectée par la communauté scientifique.

### Accélérer les particules pour accélérer les découvertes

Comme dans le cas des neutrinos des réacteurs nucléaires, ces nouvelles expériences font appel à deux types de détecteurs, proche et lointain. Elles s'appuient sur les résultats en cours d'accumulation par T2K et son détecteur lointain Super-Kamiokande, situé sous terre à 295 km de la source, et qui amorcera sa deuxième phase fin 2022.

Sur le principe, des protons, accélérés à des énergies très importantes (30 GeV), viennent frapper une cible de carbone et casser les nucléons de la matière. Cela libère une cascade de particules, dont des pions sélectionnés dans un tunnel à l'aide de cornes magnétiques. Ceux-ci se désintègrent pour donner des neutrinos ou des antineutrinos muoniques envoyés en faisceau vers le détecteur lointain, et c'est leur transformation en neutrinos et antineutrinos électroniques qui est mesurée. « En jouant sur la charge des pions, on génère soit un faisceau de neutrinos soit un faisceau d'antineutrinos », explique Sandrine Emery-Schrenk. À l'arrivée, un réservoir, contenant des tonnes d'eau liquide parfaitement transparente et orné de photomultiplicateurs, enregistre la lumière bleue émise par le passage des muons et des électrons issus des interactions quasi-élastiques des neutrinos pour remonter jusqu'à leur saveur.

Si la matière est parfaitement symétrique, les probabilités qu'un neutrino et son antiparticule, l'antineutrino, changent de saveur en cours de trajet doivent être les mêmes. Or les résultats de T2K semblent indiquer le contraire : la probabilité est nettement plus marquée dans le cas d'un neutrino que d'un antineutrino. L'objet de la phase II de T2K et des futures expériences DUNE et Hyper-Kamiokande est d'enrichir les lots de données et d'améliorer la statistique. « L'enjeu est de bombarder suffisamment de protons sur la cible pour produire un faisceau plus intense de neutrinos », détaille Fabien Cavalier, impliqué avec l'IJCLab dans la création de l'accélérateur de protons de DUNE au Fermilab. « Grâce à ces faisceaux de neutrinos beaucoup plus puissants et des détecteurs lointains plus massifs, on devait multiplier par trois le nombre de données récoltées

par la phase II de T2K, et bien davantage avec Hyper-Kamiokande », confie Sandrine Emery-Schrenk, impliquée dans la mise au point de l'instrumentation de la phase II de T2K, notamment le détecteur proche qui sera également utile à Hyper-Kamiokande et DUNE.

Prévues pour démarrer en 2026 et 2027 et fournir leurs premières analyses d'ici 2030, DUNE et Hyper-Kamiokande affichent un gigantisme sans commune mesure. Si la technique utilisée par Hyper-Kamiokande est similaire à celle de Super-Kamiokande, le volume d'eau du détecteur lointain sera dix fois plus important. Celui de DUNE contiendra lui 40 000 tonnes, non pas d'eau, mais d'argon liquide. Il sera situé sous terre à 1 300 km du Fermilab. Avec ses quatre modules rectangulaires refroidis à -185 °C et contenant chacun près de 18 000 tonnes d'argon liquide, il sera le plus grand détecteur de ce type au monde.

« Chaque module est une chambre à dérive comprenant deux anodes placées autour d'une cathode portée à haut potentiel électrique. Lorsqu'un neutrino tapera sur un noyau d'argon, cela créera un électron ou un muon. Ces particules chargées ioniseront l'argon, et les particules ionisées produites dériveront entre l'anode et la cathode puis seront collectées sur une grille en haut ou en bas du module. La lumière émise lors de l'ionisation sera détectée par les photomultiplicateurs placés autour du détecteur. L'ensemble permettra de reconstruire la trajectoire des particules chargées et de révéler les neutrinos et leur saveur », explique Fabien Cavalier, dont le laboratoire est responsable des 800 m<sup>2</sup> de cathode en fibres de verre et de la centaine de cheminées de descente de l'électronique dans les cryostats.

### À la recherche d'une désintégration déterminante

Dans leur recherche d'explications à l'asymétrie matière/antimatière, les scientifiques se passionnent aussi pour un mode de décroissance très particulier, rare et pour l'heure non-observé : la double désintégration  $\beta$  sans émission de neutrinos. De grandes expériences lui sont dédiées, comme CUORE ou NEMO, ou dans l'avenir CUPID et SUPER-NEMO, leur continuité. « Si on parvenait à l'observer, cela nous dirait que les neutrinos sont des fermions de Majorana », explique Claudia Nones, chercheuse au DPhP. D'après le modèle standard, pour chaque particule il existe son exacte opposée, l'antiparticule. S'il s'avérait que le neutrino était à la fois sa particule et sa propre antiparticule, cela éluciderait la disparition de l'antimatière de l'Univers.

Mais observer cette décroissance n'est pas aisée : elle se produit dans un noyau moins

d'une fois toutes les 10<sup>26</sup> années ! Et seulement 35 isotopes naturels sont concernés, dont quelques-uns sont étudiés par les scientifiques. Pour s'affranchir de la radioactivité naturelle et augmenter leurs chances d'apercevoir cette désintégration, les scientifiques descendent dans des laboratoires souterrains, comme celui de Modane en Savoie (France), où la roche constitue un écran.

Prélude à l'expérience CUPID, prévue pour démarrer en 2026 au laboratoire national du Gran Sasso (Italie) et durer dix ans, l'expérimentation CUPID-Mo menée récemment à Modane repose sur des bolomètres cryogéniques à scintillation. « Les cristaux utilisés contiennent un isotope d'intérêt. Quand une particule passe à travers l'un d'eux, elle relâche de l'énergie et le réseau cristallin se met à vibrer. Cela produit des phonons qui augmentent la température du cristal. Cette augmentation est alors détectée par un thermomètre collé au cristal : pour gagner en sensibilité, on travaille à des températures de 10 à 20 mK », explique Claudia Nones. Le bolomètre est également un scintillateur : lorsque la particule tape sur le cristal, celui-ci émet de la lumière, enregistrée par un second type de bolomètre. « On obtient en coïncidence un signal thermique et une production de lumière, pour mieux discriminer la particule d'origine. » Si certaines expériences privilégient des cristaux d'oxyde de tellure (TeO<sub>2</sub>) – l'isotope <sup>130</sup>Te étant naturellement très abondant (34 % du tellure naturel) –, CUPID-Mo utilise des cristaux de molybdate de lithium (Li<sub>2</sub>MoO<sub>4</sub>), l'isotope <sup>100</sup>Mo, quoique moins abondant (10 % du molybdène naturel), étant plus prometteur.

L'équipe est parvenue à déterminer le temps de demi-vie du <sup>100</sup>Mo avec la meilleure limite au monde – 1,4 × 10<sup>24</sup> an – et à engager un changement d'échelle sous les meilleurs auspices. Les bolomètres cryogéniques à scintillation de CUPID abriteront plus d'un millier de cristaux de Li<sub>2</sub>MoO<sub>4</sub>, avec une disposition maximisée. « On sera en mesure d'observer un événement par an et par tonne de détecteur », annonce Claudia Nones.

La nouvelle physique n'est plus très loin...


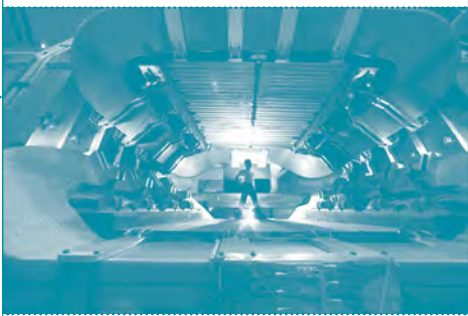
### Publications

- The Double Chooz Collaboration. Double Chooz  $\theta_{13}$  measurement via total neutron capture detection. *Nat. Phys.* 16, 558–564 (2020).
- The T2K Collaboration. Constraint on the matter-antimatter symmetry-violating phase in neutrino oscillations. *Nature* 580, 339–344 (2020).
- Abi, B. et al. Prospects for beyond the Standard Model physics searches at the Deep Underground Neutrino Experiment. *Eur. Phys. J. C* 81, 322 (2021).
- The CUPID collaboration, Characterization of cubic Li<sub>2</sub><sup>100</sup>MoO<sub>4</sub> crystals for the CUPID experiment, *Eur. Phys. J. C.* 81, 104 (2021).





<p>Journal</p> <p><b>Medium</b></p>	<p>Journal</p> <p><b>la Repubblica</b></p>	<p>Journal</p> <p><b>Daily Mail</b></p>
<p>Titre</p> <p><b>MEASURING THE IMPACTS OF SHARED AND ELECTRIC AUTONOMOUS VEHICLES (SAEV) ON URBAN MOBILITY</b></p>	<p>Titre</p> <p><b>DALLA ZANZARA TIGRE AL RATTO NERO, QUANTO CI COSTA L'INVASIONE DELLE SPECIE ALIENE</b></p>	<p>Titre</p> <p><b>NEARLY 14 TONS OF EXTRATERRESTRIAL "DUST" FROM PASSING COMETS AND ASTEROIDS LANDS ON EARTH EVERY DAY, STUDY REVEALS</b></p>
<p>Exploring the research into the impacts of SAEVs, using concepts from sustainability and technology assessment.</p> <p><a href="https://medium.com/digital-diplomacy/measuring-the-effects-of-shared-and-electric-autonomous-vehicles-saev-on-urban-mobility-417b404128e4">https://medium.com/digital-diplomacy/measuring-the-effects-of-shared-and-electric-autonomous-vehicles-saev-on-urban-mobility-417b404128e4</a></p>	 <p>Un team di ricercatori francesi ha calcolato i danni economici dovuti alla diffusione di specie esotiche come la zanzara tigre asiatica, le formiche rosse e i ratti neri. Perdite di decine di miliardi di dollari ogni anno. Solo nel 2017 si è arrivati a 162 miliardi.</p> <p><a href="https://www.repubblica.it/green-and-blue/2021/04/01/news/dalla_zanzara_tigre_ai_topi_neri_quanto_ci_costa_l_invasione_delle_specie_aliene-294642626/">https://www.repubblica.it/green-and-blue/2021/04/01/news/dalla_zanzara_tigre_ai_topi_neri_quanto_ci_costa_l_invasione_delle_specie_aliene-294642626/</a></p>	<p>Over 5,000 tons of microscopic "micrometeorites" fall to the ground every year. This is about 14 tons a day that comes from passing comets and asteroids. The chief components are iron, nickel, magnesium and silicon. Researchers measured the particles at the Concordia station in Antarctica. The lack of snow and terrestrial dust makes the location ideal for collection.</p> <p><a href="https://www.dailymail.co.uk/wires/reuters/article-917217/Frances-Macron-tells-isolated-students-look-one-another.html">https://www.dailymail.co.uk/wires/reuters/article-917217/Frances-Macron-tells-isolated-students-look-one-another.html</a></p>

<p>Journal</p> <p><b>THE STRAITS TIMES</b></p>	<p>Journal</p> <p><b>ScienceDaily</b></p>	<p>Journal</p> <p><b>SCIENTIFIC AMERICAN</b></p>
<p>Titre</p> <p><b>DINNER ON BOARD SPACE STATION: BEEF BURGUNDY OR LOBSTER?</b></p>	<p>Titre</p> <p><b>GREEN CHEMISTRY AND BIOFUEL: THE MECHANISM OF A KEY PHOTOENZYME DECRYPTED</b></p>	<p>Titre</p> <p><b>MUON RESULTS THROW PHYSICISTS' BEST THEORIES INTO CONFUSION</b></p>
 <p>Space agencies ensure astronauts can enjoy a quality meal at times amid hectic schedule.</p> <p><a href="https://www.straitstimes.com/world/dinner-on-board-space-station-beef-burgundy-or-lobster-o">https://www.straitstimes.com/world/dinner-on-board-space-station-beef-burgundy-or-lobster-o</a></p>	<p>The functioning of the enzyme FAP, useful for producing biofuels and for green chemistry, has been decrypted. This result mobilized an international team of scientists, including many French researchers from the CEA, CNRS, Inserm, École Polytechnique, the universities of Grenoble Alpes, Paris-Saclay and Aix Marseille, as well as the European Synchrotron (ESRF) and synchrotron SOLEIL. The study is published in Science on April 09, 2021.</p> <p><a href="https://www.sciencedaily.com/releases/2021/04/210408153628.htm">https://www.sciencedaily.com/releases/2021/04/210408153628.htm</a></p>	 <p>Experimental anomalies have sent researchers scrambling to concoct new explanations.</p> <p><a href="https://www.scientificamerican.com/article/muon-results-throw-physicists-best-theories-into-confusion/">https://www.scientificamerican.com/article/muon-results-throw-physicists-best-theories-into-confusion/</a></p>

Titre

## Un campus en harmonie avec son milieu naturel

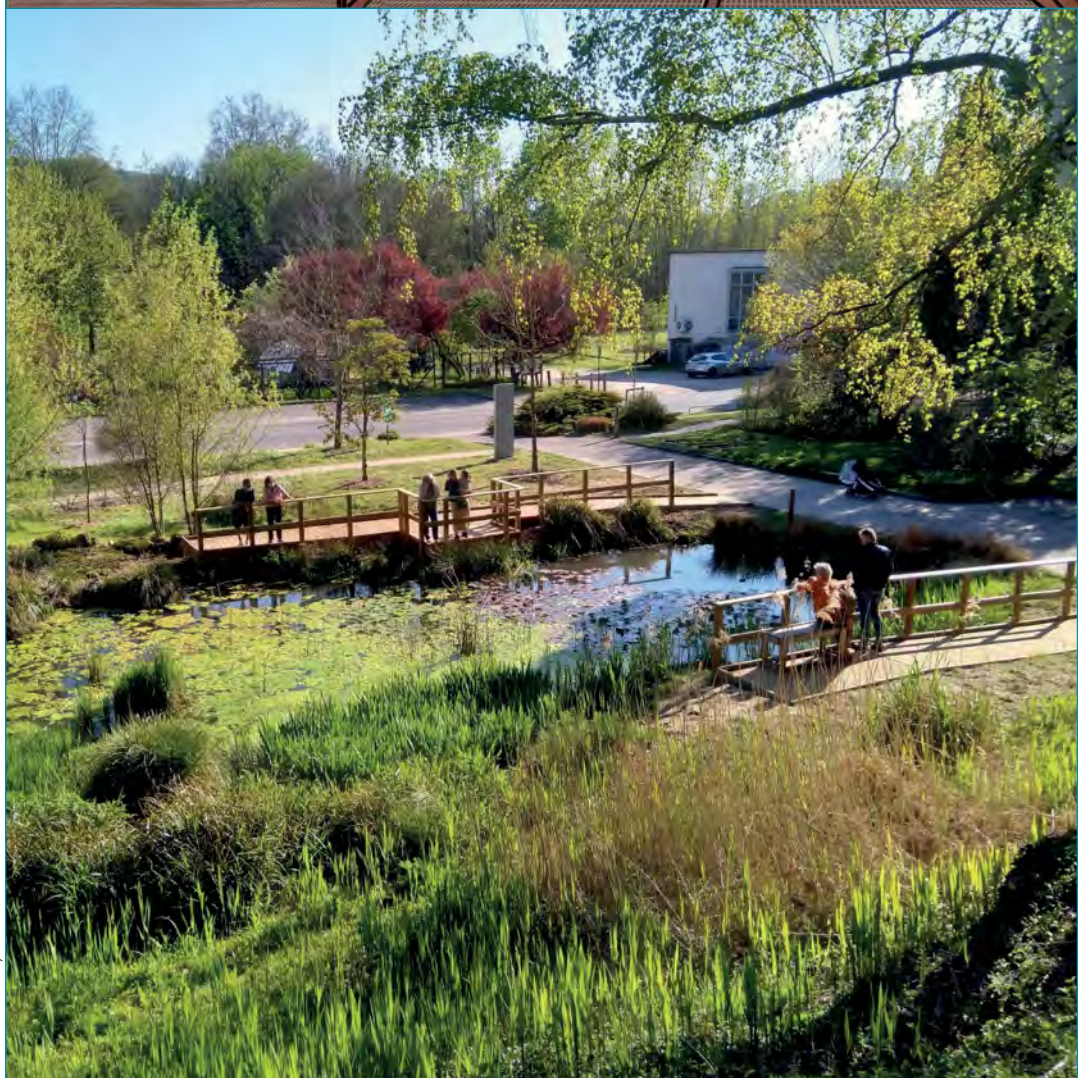
De nombreux travaux d'aménagement et de réaménagement, présents ou à venir, viennent embellir le campus de l'Université Paris-Saclay et contribuer à mieux l'intégrer à son environnement.

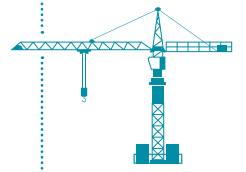
Valoriser le cadre naturel exceptionnel dans lequel se situent les campus vallée et plateau, telle est la volonté de l'Université, de la Communauté Paris-Saclay et de l'Établissement public d'aménagement Paris-Saclay. Une valorisation qui passe notamment par le (ré)aménagement des voies de circulations douces qui traversent ces sites.

Le chantier débuté en avril 2021 concerne essentiellement des tracés déjà accessibles au public par le passé, mais délaissés ou peu entretenus, et offrira plus de confort aux usagers. Au total, plus d'un kilomètre de chemins sur 60 mètres de dénivelé, autour des bâtiments, dans les bois et sur les coteaux, sera réhabilité dans une démarche d'intégration, respectueuse des logiques paysagères de la vallée. Certains cheminements piétons reliant les résidences universitaires et les établissements du campus, notamment autour du centre équestre universitaire d'Orsay, sont déjà accessibles. En revanche, il faudra attendre la rentrée 2021 pour réemprunter les tronçons reliant le plateau à la vallée.

En attendant, les étudiants ayant soif de verdure peuvent se rendre au jardin botanique de l'Université pour y découvrir ses nouveaux aménagements. Le Service environnement et paysages de la Direction de l'aménagement du patrimoine et de l'immobilier de l'Université a profité de la baisse de fréquentation des derniers mois pour notamment procéder à l'entretien et la rénovation des structures du jardin (ponton, muret...). Labelisé «Jardin botanique de France et des pays francophones» depuis 2001, le site regroupe une grande variété d'espèces végétales, endémiques et exotiques, ainsi que des espèces protégées. Le jardin répond à des missions non seulement de conservation mais aussi scientifiques et pédagogiques : communautés étudiante et de recherche viennent y faire leurs propres observations.

Les usagers et les riverains du campus ne sont pas en reste : une promenade, à pied ou en vélo, le long des berges restaurées de l'Yvette leur tend les bras. Le cours d'eau qui traverse le campus d'Est en Ouest a fait l'objet de 2019 à 2020 d'un grand chantier de restauration écologique et de lutte contre les inondations : c'est désormais un lieu de flânerie idéal et un espace privilégié pour l'observation de la faune et de la flore locales.





Titre

## Le prune se déploie sur les campus de l'Université



© Christophe Peus

Avec ses composantes universitaires, établissements-composantes, universités membres associés et partenaires de recherche, l'Université Paris-Saclay s'étend sur une multitude de sites du sud-ouest francilien, en passant par Paris. Afin d'assurer la cohérence visuelle entre ces différents lieux d'étude et de recherche et marquer leur appartenance à un même regroupement, ces sites parfois très éloignés géographiquement les uns des autres ont adopté la charte graphique de l'Université. Panneaux, oriflammes ou encore plaques de rue arborant la fameuse couleur prune, signature de l'Université Paris-Saclay, habillent désormais les campus d'Orsay, Sceaux, Châtenay-Malabry et Cachan. Une homogénéisation de la signalétique initiée fin décembre 2019 pour marquer la création de l'Université au 1<sup>er</sup> janvier 2020 et qui se poursuit aujourd'hui.

© Bruel Delmar




Titre

## Des étudiants pour sensibiliser leurs pairs à la Covid-19

Face à la précarité financière de certains de ses étudiants et étudiantes et pour améliorer la gestion de la crise sanitaire, l'Université Paris-Saclay a proposé fin janvier des contrats de travail pour une mission de sensibilisation à la prévention des risques liés à la Covid-19 sur le campus. Identifiables à leur tenue taguée #TOUSANTICOVID, les étudiants recrutés, issus des différentes composantes universitaires de Paris-Saclay, ont sensibilisé au respect des gestes barrières, au dépistage et à l'isolement en cas de symptômes et de test positif. D'une quarantaine au plus fort de la 3<sup>e</sup> vague, ils n'ont plus été qu'une dizaine à assurer leur mission jusqu'à la fin des examens en juin. Une initiative louable, coordonnée par le Service de santé universitaire (SSU), la Direction de la vie étudiante et de l'égalité des chances (DVEEC) et les services de soutien étudiant des composantes, dont on espère toutefois qu'elle n'aura pas à être renouvelée à la rentrée universitaire, en septembre.

© VM - Université Paris-Saclay



<b>ON Y ÉTAIT</b>			<b>Date</b> 17	<b>Lieu</b> En ligne et à Gif-sur-Yvette	<b>Hôte</b> Université Paris-Saclay	<b>Date</b> Du 20 au 23	<b>Lieu</b> Palaiseau	<b>Hôte</b> Inria, DATAIA, IRT SystemX, DFKI
<b>MAI</b>			<b>THOMAS PESQUET EN DIRECT DEPUIS L'ESPACE</b>			<b>SUMMER SCHOOL IDAI 2021</b>		
<b>Date</b> Du 20 au 21	<b>Lieu</b> En ligne	<b>Hôte</b> French Tech Paris-Saclay, Région Île-de-France, EPAPS	<b>Description</b> Le 17 juin 2021, l'ISS avec à son bord le spatio-naute français Thomas Pesquet, est passée au-dessus du campus de l'Université. À cette occasion, dans le cadre de l'organisation ARISS (Amateur Radio on the ISS), le collègue Albert Camus de la Norville et l'Université Paris-Saclay ont été sélectionnés avec le club radio-amateur F5KEE (Viry-Châtillon, Essonne) pour entrer en contact radio avec Thomas Pesquet. Ce contact exceptionnel a été animé par Fred Courant de <i>l'Esprit sorcier</i> et a fait l'objet d'une émission retransmise sur la chaîne YouTube de l'Université. <a href="https://www.universite-paris-saclay.fr/evenements/thomas-pesquet-en-direct-depuis-lespace">https://www.universite-paris-saclay.fr/evenements/thomas-pesquet-en-direct-depuis-lespace</a>			<b>Description</b> Inria, l'Institut DATAIA, l'IRT SystemX et le centre de recherche allemand en intelligence artificielle (DFKI) organisent la première école d'été européenne en intelligence artificielle (IA). Cet événement s'inscrit dans le cadre du partenariat national entre les établissements, visant à soutenir des actions de recherche communes en matière d'IA. <a href="https://idessai.inria.fr/">https://idessai.inria.fr/</a>		
<b>Titre</b> <b>SALON PARIS-SACLAY SPRING</b>						<b>SEPTEMBRE</b>		
<b>Description</b> L'Université Paris-Saclay et son centre de design, le Design Spot, ont participé à la 3 <sup>e</sup> édition, 100 % digitale, de ce salon qui réunit les acteurs de l'innovation, de la recherche, de la science et du développement économique du territoire Paris-Saclay. L'objectif était de montrer comment, au-delà de la crise, la première communauté d'innovation partagée française se développe plus que jamais. Avec une spécificité pour cette manifestation : mettre en lumière 50 start-up, pépites du cluster Paris-Saclay, et montrer leurs innovations. <a href="https://paris-saclay-spring.com/">https://paris-saclay-spring.com/</a>			<b>Date</b> Du 28 au 30	<b>Lieu</b> En ligne	<b>Hôte</b> INRAE, AgroParisTech			
<b>JUIN</b>			<b>22<sup>ES</sup> JOURNÉES NATIONALES SUR LES COMPOSITES (JNC)</b>			<b>Description</b> L'exposition « Au fil des êtres vivants, les vertébrés, une biodiversité visible » à la Faculté des sciences Paris-Saclay comprend des courts panneaux informatifs illustrés (et traduits en anglais), accompagnés d'animaux naturalisés. Des ateliers, des jeux et des animations seront également proposés. <a href="https://openagenda.com/universite-paris-saclay/events/au-fil-des-etres-vivants-les-vertebres-une-biodiversite-visible">https://openagenda.com/universite-paris-saclay/events/au-fil-des-etres-vivants-les-vertebres-une-biodiversite-visible</a>		
<b>Date</b> 17	<b>Lieu</b> En ligne	<b>Hôte</b> Université Paris-Saclay	<b>Description</b> Organisé par l'Association pour les matériaux composites (AMAC), les JNC permettent périodiquement de faire le point sur les dernières avancées scientifiques et technologiques, et constituent un lieu de rencontre et de débat pour les enseignants, chercheurs et industriels concernés par les composites.			<b>NOVEMBRE</b>		
<b>Titre</b> <b>20<sup>E</sup> JOURNEE DE L'ÉCOLE DOCTORALE « INNOVATION THERAPEUTIQUE : DU FONDAMENTAL A L'APPLIQUE »</b>			<b>NE PAS MANQUER</b>					
<b>Description</b> Cette journée a été un moyen de présenter, à un public scientifique regroupant en moyenne 200 doctorants et chercheurs chaque année, les différents domaines de recherche de l'école doctorale « Innovation thérapeutique : du fondamental à l'appliqué » (ITFA) : de la chimie à la pharmacologie en passant par l'immunologie, l'ingénierie des protéines, la microbiologie, la pharmacotechnie et la signalisation cellulaire. <a href="https://www.universite-paris-saclay.fr/evenements/journee-de-lecole-doctorale-innovation-therapeutique">https://www.universite-paris-saclay.fr/evenements/journee-de-lecole-doctorale-innovation-therapeutique</a>			<b>JUILLET</b>			<b>Titre</b> <b>FESTIVAL ARTS &amp; SCIENCES CURIOSITAS</b>		
<b>Date</b> Du 3 au 4	<b>Lieu</b> En ligne	<b>Hôte</b> Université Paris-Saclay	<b>2<sup>E</sup> ÉDITION DU FESTIVAL DU BIG BANG AUX BIG BANDS</b>					
<b>Description</b> Pour sa 2 <sup>e</sup> édition, le festival « Du Big Bang aux big bands » vous invite à un croisement original entre musique, cinéma, astronomie, lectures, reportages, dessins et science-fiction. <a href="http://www.dubigbangauxbigbands.fr/">http://www.dubigbangauxbigbands.fr/</a>			<b>Description</b> CURIOSITAS propose de découvrir des œuvres aux frontières entre l'art et la science. Au programme : installations interactives, spectacles, ateliers et débats. Le festival s'adresse à tous : familles et enfants, jeunes et étudiants, scientifiques, artistes et toutes celles et ceux qui ont envie de découvrir ces projets originaux. <a href="https://www.universite-paris-saclay.fr/evenements/festival-arts-sciences-curiositas">https://www.universite-paris-saclay.fr/evenements/festival-arts-sciences-curiositas</a>					

## Ont contribué à ce numéro :

**Christine Aubry**, chercheuse au laboratoire des Sciences pour l'action et le développement: activités, produits, territoires (SADAPT – Univ. Paris-Saclay, INRAE, AgroParisTech) • **Daniel Augot**, chercheur à Inria Saclay • **Luc Bergé**, chercheur au Laboratoire matière sous conditions extrêmes (LMCE – Univ. Paris-Saclay, CEA) • **François Bobot**, chercheur au Département ingénierie des logiciels et des systèmes du CEA-List (Univ. Paris-Saclay, CEA) • **Sara Bolognesi**, chercheuse au Département de physique des particules (DPhP – Univ. Paris-Saclay, CEA) • **Christian Bolzmacher**, chercheur au Laboratoire d'intégration de systèmes et de technologies (List – Univ. Paris-Saclay, CEA) • **David Olivier Bouchez**, responsable de la filière Innovation-Entrepreneurs (FIE) de l'Institut d'Optique Graduate School • **Sylvain Bouley**, planétologue au laboratoire Géosciences Paris-Saclay (GEOPS – Univ. Paris-Saclay, CNRS) • **Willem Boutu**, chercheur au Laboratoire interactions, dynamiques et lasers (LIDYL – Univ. Paris-Saclay, CEA, CNRS) • **Thibault Cantat**, chercheur au laboratoire Nanosciences et innovation pour les matériaux, la biomédecine et l'énergie (NIMBE – Univ. Paris-Saclay, CEA, CNRS) • **Fabien Cavalier**, chercheur au Laboratoire de physique des deux infinis – Irène Joliot-Curie (IJCLab – Univ. Paris-Saclay, CNRS, Univ. de Paris) • **Philippe Chambon**, directeur-général de la start-up EG427 • **Nathalie Claret**, co-responsable de la licence professionnelle Management et gestion des organisations de l'IUT de Sceaux • **Mélanie Clément-Fontaine**, chercheuse au Laboratoire de Droit des affaires et nouvelles technologies (DANTE – Univ. Paris-Saclay, UVSQ) • **Pascal Corbel**, chargé de mission Entrepreneurat au sein de l'Université Paris-Saclay • **Hélène Courvoisier**, biologiste à l'Université Paris-Saclay • **Hervé Dole**, astrophysicien et vice-président Art, culture, science et société à l'Université Paris-Saclay • **Erica Dorr**, chercheuse au laboratoire des Sciences pour l'action et le développement: activités, produits, territoires (SADAPT – Univ. Paris-Saclay, INRAE, AgroParisTech) • **Niels Dutrievoz**, ancien étudiant de l'ENS Paris-Saclay et membre de l'expédition Antarctique 2.0 °C • **Sandrine Emery-Schrenk**, chercheuse au Département de physique des particules (DPhP – Univ. Paris-Saclay, CEA) • **Jean-Christophe Gabriel**, chercheur au laboratoire Nanosciences et innovation pour les matériaux, la biomédecine et l'énergie (NIMBE – Univ. Paris-Saclay, CEA, CNRS) • **Jean-François Galloüin**, professeur à CentraleSupélec • **Laurent Gremillet**, chercheur au Laboratoire matière sous conditions extrêmes (LMCE – Univ. Paris-Saclay, CEA) • **Jean-François Hergott**, chercheur au Laboratoire interactions, dynamiques et lasers (LIDYL – Univ. Paris-Saclay, CEA, CNRS) • **Étienne Herth**, ingénieur de recherche au Centre de nanosciences et de nanotechnologies (C2N – Univ. Paris-Saclay, CNRS) • **Matthieu Lancry**, chercheur à l'Institut de chimie moléculaire et des matériaux d'Orsay (ICMMO – Univ. Paris-Saclay, CNRS) • **Gaël Latour**,

maître de conférences à l'Université Paris-Saclay

• **Florence Law**, responsable du diplôme inter-établissements étudiant-entrepreneur (D2E) du Pépite PEIPS • **Frédéric Leriche**, responsable du master Ingénierie de la transition touristique et écologique (ITTE) • **Véronique Magnier**, chercheuse à l'Institut droit éthique patrimoine (IDEP – Univ. Paris-Saclay) • **Rachel Méallet-Renault**, chercheuse à l'Institut des sciences moléculaires d'Orsay (ISMO – Univ. Paris-Saclay, CNRS) • **Hamed Merdji**, chercheur au Laboratoire interactions, dynamiques et lasers (LIDYL – Univ. Paris-Saclay, CEA, CNRS) • **Claudia Nones**, chercheuse au Département de physique des particules (DPhP – Univ. Paris-Saclay, CEA) • **Erwan Panier**, docteur du laboratoire d'Énergie moléculaire et macroscopique, combustion (EM2C – Univ. Paris-Saclay, CentraleSupélec, CNRS) • **Bertrand Poumellec**, chercheur à l'Institut de chimie moléculaire et des matériaux d'Orsay (ICMMO – Univ. Paris-Saclay, CNRS) • **Loïc Rajjou**, chercheur à l'Institut Jean-Pierre Bourgin (IJPB – Univ. Paris-Saclay, INRAE, AgroParisTech) • **André Torre**, chercheur au laboratoire des Sciences pour l'action et le développement: activités, produits, territoires (SADAPT – Univ. Paris-Saclay, INRAE, AgroParisTech) • **Sara Tucci-Piergiovanni**, cheffe de laboratoire au Département ingénierie des logiciels et des systèmes du CEA-List (Univ. Paris-Saclay, CEA) • **Eric Vibert**, professeur à la Faculté de médecine Paris-Saclay • **Matthieu Vivier**, chercheur au Département de physique des particules (DPhP – Univ. Paris-Saclay, CEA) • **Bernard Yannou**, chercheur au Laboratoire génie industriel (LGI – Univ. Paris-Saclay, CentraleSupélec).

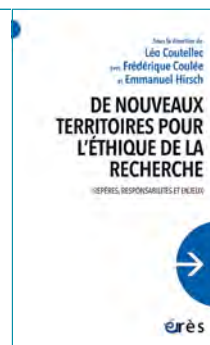
## Membres du Comité éditorial ayant participé au numéro :

**Loraine Borges-Pereira • Cendrine Campo • Pascal Corbel • Julien Denervaux • Tania Di Gioia • Marie Dufresne • Marie Etave • Claire Fourné • Fabrice Gatuingt • Gaëlle Giraudier • Catherine Hordelalay • Claire Janoir • Delphine Joseph • Olivier Kahn • Ombeline Labaune • Vincent Lebon • Pierre-Gilles Lemarié-Rieusset • Said Mammam • Sophie Martin • Cécile Pérol • Bertrand Poumellec • Magalie Quet • Léa Remaud • Hervé Rivières • Jacqui Shykoff • Julien Signoles • Tiina Suomijarvi • Nathalie Touze**

**Directrice de la publication :** Sylvie Retailleau  
**Directrice de la rédaction :** Marie-Pauline Gacoin  
**Rédactrice en chef :** Véronique Meder  
**Rédaction :** Maeva Chopard, Ingrid Colleau, Claire Gerardin, Véronique Meder, Patricia Muller, Tiago Outerelo Corvo  
**Direction artistique :** The Shelf Company  
**Impression :** Stipa

ISSN 2679-4845 (imprimé) – ISSN 2777-4007 (en ligne)  
Dépôt légal à parution

## À LIRE



### De nouveaux territoires pour l'éthique de la recherche

Léo Coutellec, maître de conférences en épistémologie et éthique des sciences contemporaines à la Faculté de médecine de l'Université Paris-Saclay, Frédérique Coulée, professeure de droit public à la Faculté Jean Monnet (Droit, Économie, Gestion) et Emmanuel Hirsch, professeur d'éthique médicale à la Faculté de médecine de l'Université Paris-Saclay, appellent à redéfinir le contrat qui lie science et société, en tenant compte à la fois des responsabilités engagées et des vulnérabilités suscitées par l'impact de certaines innovations.

Éditions Erès

## The Conversation

### Toujours plus de prisons : pour quoi faire ?

Christian Mouhanna et Annie Kensey, directeur et chercheuse au Centre de recherches sociologiques sur le droit et les institutions pénales (CESDIP – Univ. Paris-Saclay, UVSQ), reviennent sur l'annonce de la construction de nouvelles prisons et analysent le problème de la surpopulation carcérale.

<https://theconversation.com/toujours-plus-de-prisons-pour-quoi-faire-160645>

Coupon

## ABONNEZ-VOUS

en envoyant votre nom, prénom, adresse postale et email à :

[ledition@universite-paris-saclay.fr](mailto:ledition@universite-paris-saclay.fr)

ou en envoyant ce coupon par la Poste à :

Université Paris-Saclay – Direction de la marque et de la communication  
Bâtiment Breguet – 3 rue Joliot-Curie  
91190 Gif-sur-Yvette – France

Merci et bonne lecture !



nom

.....

adresse

.....

code postal

.....

courriel

.....

prénom

.....

ville

.....

pays

.....

# ANCRER LE DÉVELOPPEMENT SOUTENABLE À L'UNIVERSITÉ PARIS-SACLAY : LES RÉSULTATS D'UNE DÉMARCHE PARTICIPATIVE

Les enjeux du développement soutenable sont au cœur des préoccupations de l'Université Paris-Saclay. De septembre à décembre 2020, l'Université a mobilisé ses composantes universitaires, établissements-composantes et universités membres associés pour engager auprès des communautés étudiante et enseignante-chercheuse, et des personnels techniques et administratifs, une réflexion sur le développement soutenable et recueillir leur avis

sur la plateforme collaborative « Nos projets pour un développement soutenable à l'Université Paris-Saclay ». Cette démarche a permis de faire émerger des projets autour des axes formation, recherche, sensibilisation, pratiques, que ces communautés souhaitent voir mis en place à l'Université, et de recueillir une expression plus large des priorités en matière de développement soutenable à l'Université.

Plus d'informations : <https://ds2021-universite-paris-saclay.fr/>

« Nos projets de développement soutenable » c'est :

**754**  
contributeurs et contributrices

**600**  
heures passées sur la plateforme

plus de  
**1722**  
participants et participantes

**8**  
newsletters spéciales « démarche participative »

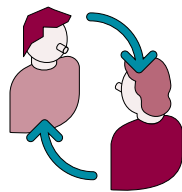
**838**  
propositions

**59**  
projets soumis au vote

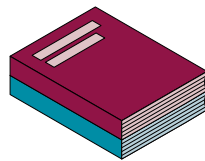
**14**  
projets retenus pour un lancement en 2021

## Les projets lauréats

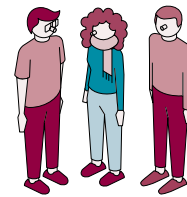
### Formation



Interactions avec des acteurs engagés

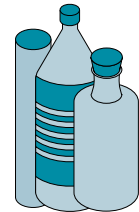


Un socle de connaissances sur le développement soutenable commun à toutes les formations



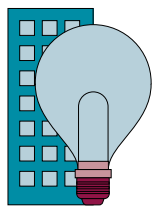
Des événements participatifs

### Recherche

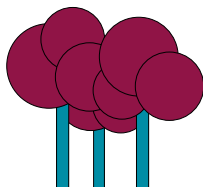


Valorisation des déchets issus de la recherche

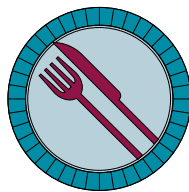
### Pratiques



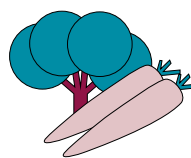
Amélioration de la performance énergétique des bâtiments



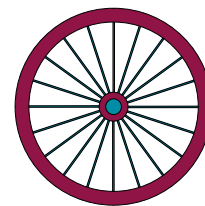
Un frein à l'artificialisation des sols sur le plateau de Saclay



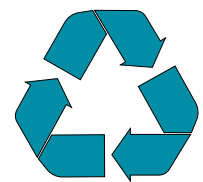
Des produits locaux dans la restauration



Tout doux sur la viande!

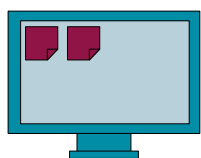


Un plan mobilités douces

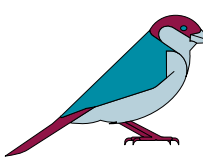


La collecte et le tri sélectif partout

### Sensibilisation



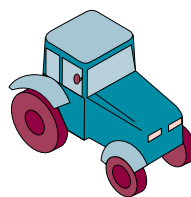
Des campagnes de sensibilisation pour les personnels



Des projets de sciences participatives



Des ateliers réguliers de sensibilisation



La microferme maraîchère

université  
PARIS-SACLAY