

**Biomatériaux de demain :
polymères biomimétiques et biohybrides**

Sébastien Lecommandoux

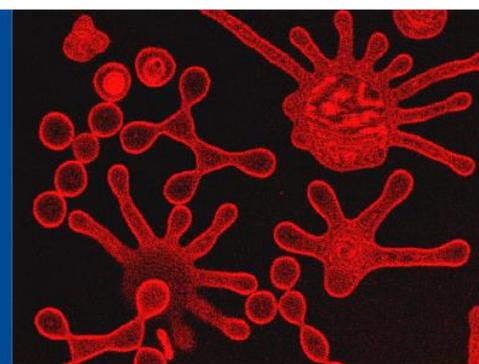
**Biomimétisme, biodégradabilité et (bio)recyclabilité des polymères:
enjeux et opportunités**

le 31 mars 2025



Biomatériaux de demain : polymères biomimétiques et biohybrides

27 janv > 31 mars 2025



Cours & séminaire

Amphithéâtre Maurice Halbwachs – Les cours auront lieu les lundis de 10h à 11h. Ils seront suivis par le séminaire de 11h à 12h.

Les cours, colloques et séminaires sont gratuits, en accès libre, sans inscription préalable.

Lundi 27 janvier 2025

COURS :

**Polymères biomimétiques :
concept général, design et applications**

SÉMINAIRE : Laurent Billon (IPREM, UPPA)
Biomimétisme et matériaux bio-inspirés

Lundi 3 février 2025

COURS :

**Les polymères à base d'acides aminés :
de l'origine de la vie aux médicaments modernes**

SÉMINAIRE :

Colin Bonduelle (LCPO, Univ. Bordeaux)
From Proteins to Polymer Synthesis

Hua Lu (Pekin Univ., Chine)
Robust Synthesis and Biomedical Applications of Polypeptides

Lundi 10 février 2025

COURS :

**Polymère biohybrides :
comment tirer le meilleur du vivant et du synthétique ?**

SÉMINAIRE :

Fouzia Boulmedais (ICS, Univ. Strasbourg)
Nanorevêtements de polysaccharides et protéines aux propriétés bioactives pour les biomatériaux

Elisabeth Garanger (LCPO, Univ. Bordeaux)
Polymères inspirés de l'élastine: stratégies de synthèse et applications biomédicales

Lundi 17 février 2025

COURS :

**Nanotechnologies biohybrides macromoléculaires
et thérapie cancer/immunothérapie**

SÉMINAIRE : Simona Mura (IGPS, Univ. Paris Saclay)
Particules circulantes comme vecteurs thérapeutiques biomimétiques

Lundi 24 février 2025

COURS :

**Des polymersomes aux cellules artificielles : mimer la
complexité du vivant pour le comprendre et le soigner**

SÉMINAIRE :

Nicolas Martin (CRPP, Univ. Bordeaux)
Coacervats : des gouttelettes dynamiques pour assembler des cellules artificielles

Léa-Lætitia Pontani (LJP, Sorbonne Univ.)
Biomimetic emulsions as a tool to study tissue architecture and mechanics

Lundi 3 mars 2025

COURS :

**Assemblages multi-composants et multi-échelles
dynamiques : du fondamental à l'application**

SÉMINAIRE : Christophe Tribet (PASTEUR, ENS-PSL)
Stabiliser, replier, cibler des protéines hors de leur contexte naturel : quelques applications d'assemblages entre protéines solubles ou membranaires et des copolymères synthétiques

Lundi 17 mars 2025

COURS :

**Quelle médecine pour demain et après-demain en cancer
et neurosciences ?**

SÉMINAIRE :

Clémentine Bosch-Bouju (Bordeaux Neurocampus)
Les polymères biomimétiques comme alliés des neurosciences dans le développement des neurotechnologies

Isabel Marey-Semper (DOXANANO)
Repousser les limites de la chimiothérapie conventionnelle grâce à la chimiothérapie activée à distance à l'aide de polymersomes bioinspirés

Lundi 31 mars 2025

COURS :

**Biomimétisme, biodégradabilité et (bio)recyclabilité des
polymères : enjeux et opportunités**

SÉMINAIRE :

Christophe Chassenieux (IMMM, Le Mans Univ.)
Les protéines comme nouvelles sources de matériaux

Daniel Taton (CLPO, Univ. Bordeaux)
Stratégies de déconstruction chimique de plastiques récalcitrants



Image : vésicules polymères (polymersomes) en train de se diviser sous l'action d'une différence de pression osmotique observées en microscopie de fluorescence. Crédit: LCPO - Emmanuel Barbouré @ Anouk Martin

Colloque Biomatériaux de demain : Polymères Biomimétiques et Biohybrides

Chair: Sébastien Lecommandoux; co-Chair: Clément Sanchez

Conférenciers invités:

Patrick Couvreur (IGPS, Univ. Paris Saclay, France)

Tim Deming (UCLA, Los Angeles, USA)

Jan van Hest (TUE, Eindhoven, Pays-Bas)

Kazunori Kataoka (iCONM, Tokyo-Kawasaki, Japon)

Harm Anton Klok (EPFL, Lausanne, Suisse)

Sébastien Lecommandoux (LCPO Bordeaux, France)

Raffaele Mezzenga (ETH Zurich, Suisse)

Molly Stevens (Univ. Oxford, UK)

Sam Stupp (Northwestern Univ, USA)

Maria Vicent (CIPF, Valence, Espagne)

**Biomatériaux de demain :
polymères biomimétiques et biohybrides**

Sébastien Lecommandoux

**Biomimétisme, biodégradabilité et (bio)recyclabilité des polymères:
enjeux et opportunités**

le 31 mars 2025



L'image sociétale actuellement négative des polymères

Polymère = Plastique =





COLLÈGE
DE FRANCE
— 1530 —

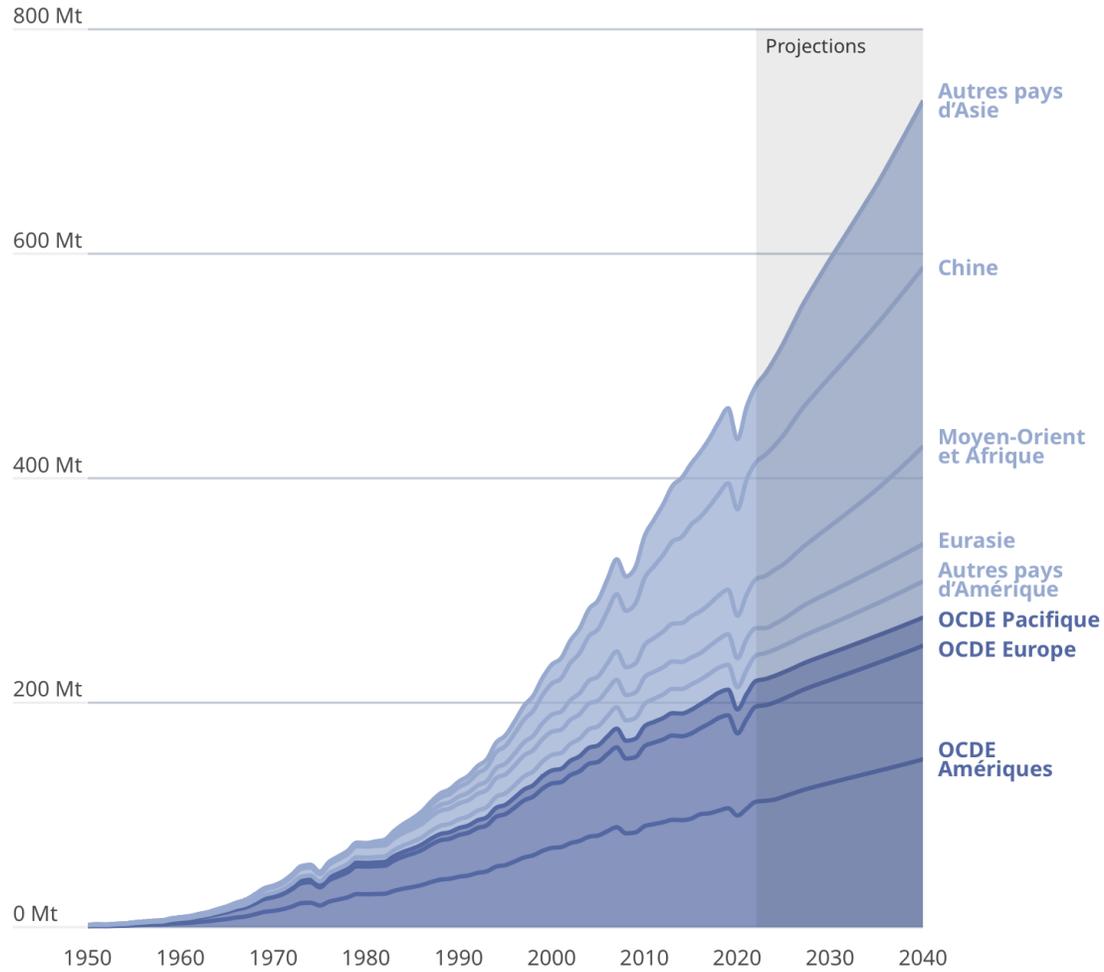
L'image sociétale actuellement négative des polymères



L'image sociétale actuellement négative des polymères

Projections d'utilisation des plastiques

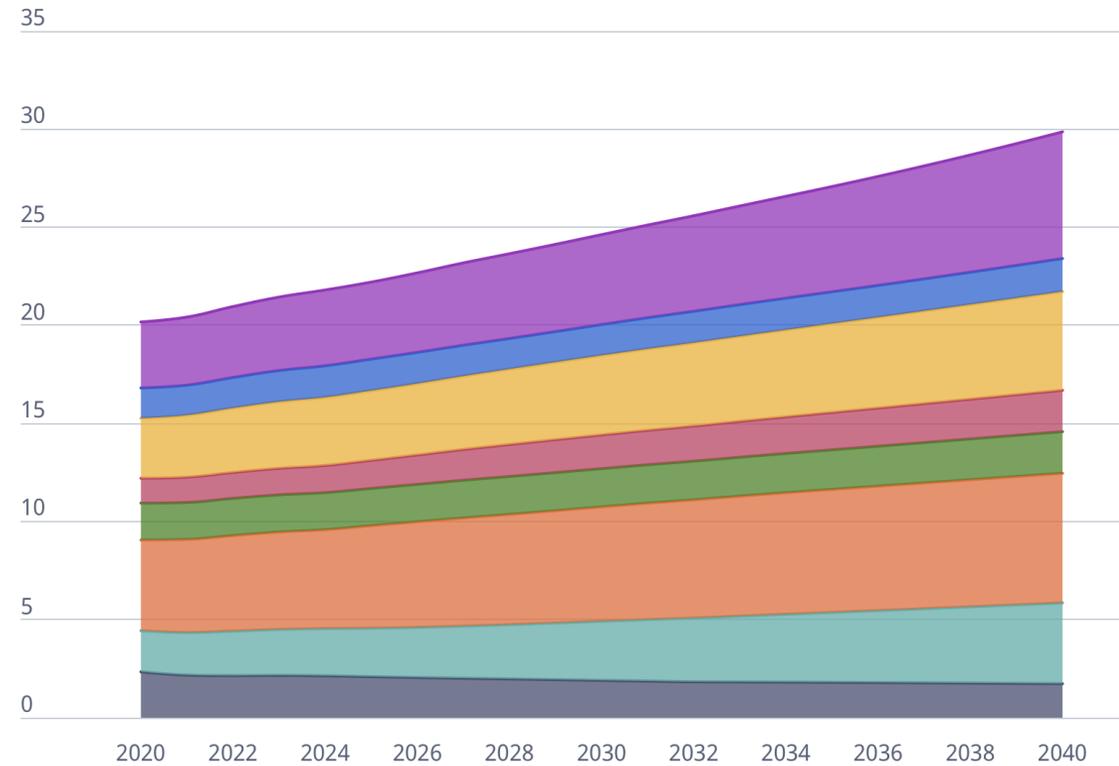
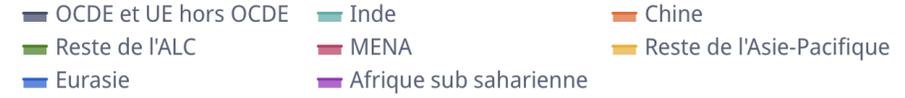
En millions de tonnes (Mt), projections à partir de 2022



Source : OCDE (2024), Scénarios d'action pour l'élimination de la pollution plastique à l'horizon 2040.

Rejets de plastiques dans l'environnement

millions de tonnes, par région, scénario de référence

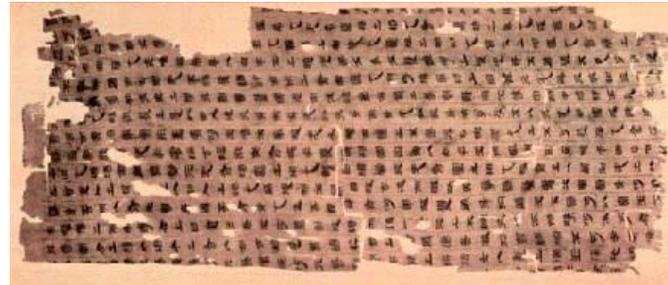


Source : OCDE (2024), Scénarios d'action pour l'élimination de la pollution plastique à l'horizon 2040

L'Homme utilise les polymères depuis des millénaires !



Les anciens Méso-Américains fabriquaient du caoutchouc au moins 1600 ans avant notre ère.



L'histoire de la soie débute en Chine entre 3000 et 2000 ans av. J.-C. (le plus vieux fragment découvert datant de 2570 av. J.-C.)



→ **Réduire la production/consommation**

→ **Recycler**

→ **revalorisation (surcyclage, upcycling)**

→ **Origine biosourcée**

→ **Bio-inspiration**

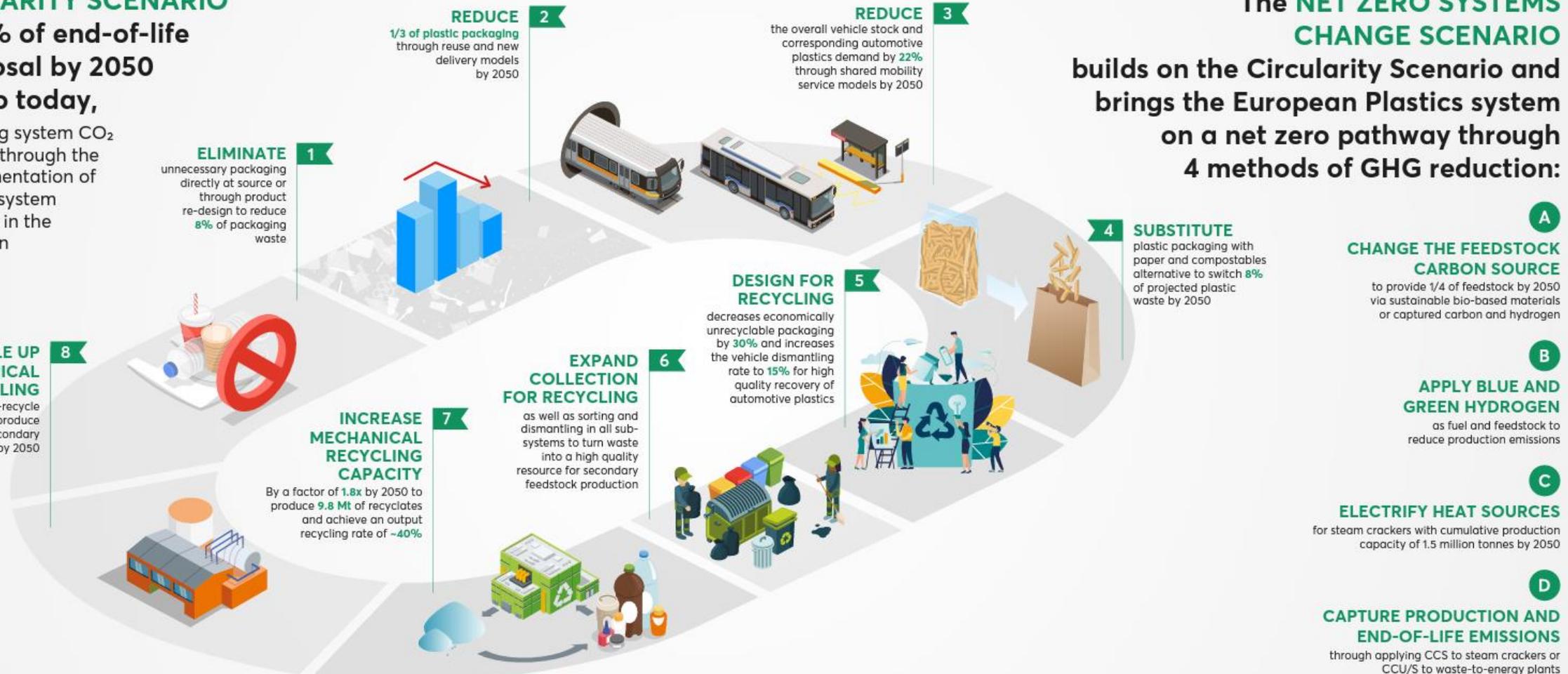
Recyclage des plastiques

Les améliorations en matière de collecte et de tri, associées à de nouvelles méthodes de recyclage des plastiques complexes, permettent de conserver la valeur du plastique tout au long de son cycle de vie. Et avec les objectifs définis par l'Union européenne en matière de contenu recyclé obligatoire, l'innovation et l'investissement sont essentiels pour trouver de meilleurs moyens de réduire les déchets et d'améliorer l'efficacité du recyclage à chaque étape du processus.

The CIRCULARITY SCENARIO reduces 80% of end-of-life plastic disposal by 2050 compared to today,

effectively reducing system CO₂ emissions by 65% through the immediate implementation of 8 complementary system intervention levers in the plastics value chain

The NET ZERO SYSTEMS CHANGE SCENARIO builds on the Circularity Scenario and brings the European Plastics system on a net zero pathway through 4 methods of GHG reduction:



Valorisation déchets plastiques et économie circulaire



Valorisation déchets plastiques et économie circulaire

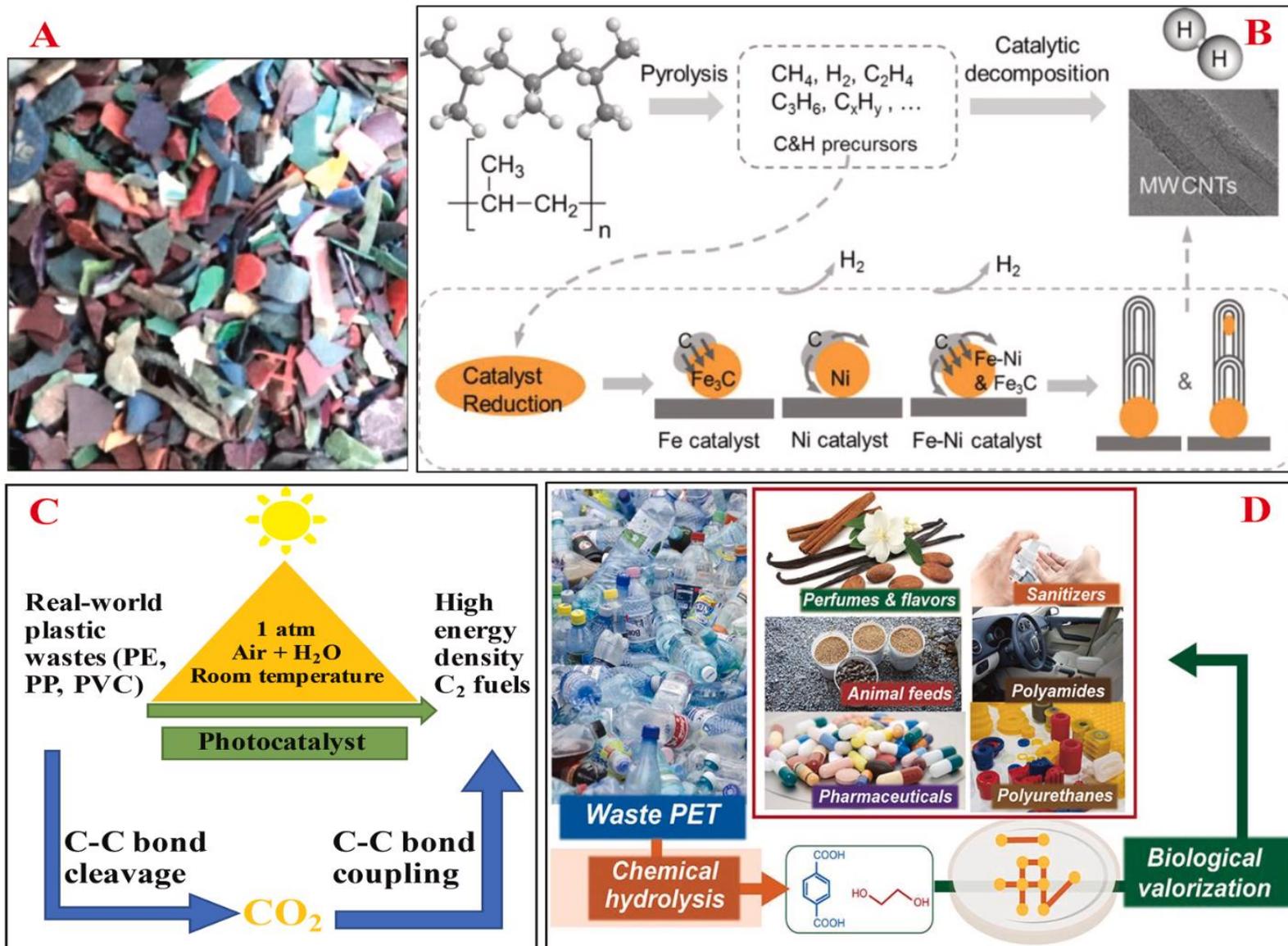
Conversion des déchets plastiques en produits à haute valeur ajoutée.

(A) Échantillon de déchets plastiques municipaux broyés et tamisés (plage de taille : 1–3 cm).

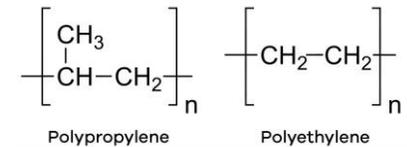
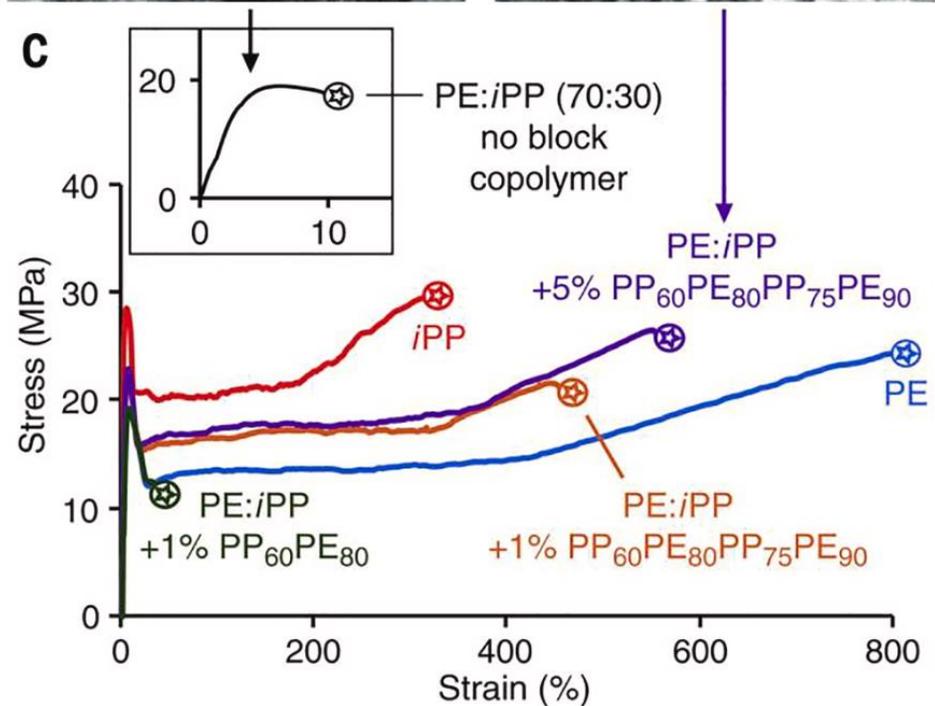
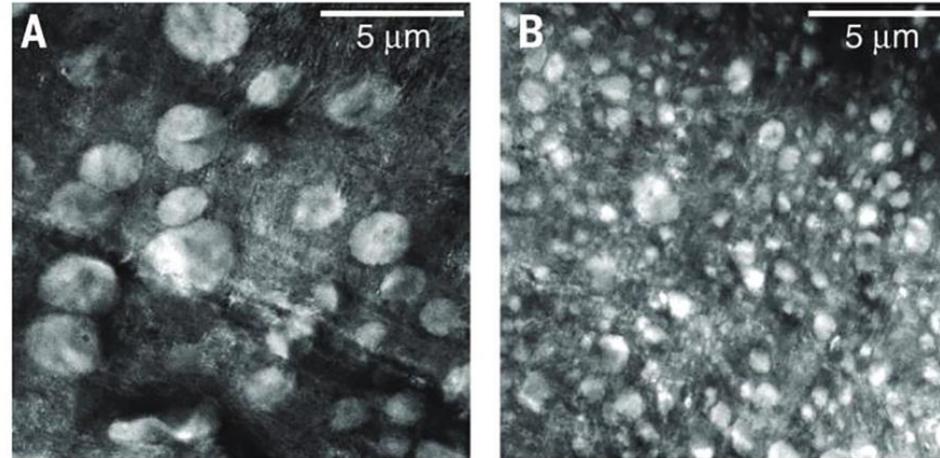
(B) Pyrolyse et décomposition catalytique du polypropylène (PP) pour produire de l'hydrogène (H₂) et des nanotubes de carbone sur des catalyseurs Fe/Ni (MWCNTs : nanotubes de carbone multi-parois).

(C) Conversion des déchets plastiques en carburants C₂ par une voie en deux étapes sur un photocatalyseur dans des conditions simulées d'environnement naturel : les plastiques sont dégradés en CO₂ par une photooxydation rompant les liaisons C–C, puis le CO₂ produit est réduit en carburants C₂ de valeur par couplage photoinduit de liaisons C–C.

(D) Schéma de la valorisation des déchets de PET : le PET est hydrolysé chimiquement en acide téréphtalique et en éthylène glycol, qui sont ensuite convertis en produits de plus grande valeur que le PET initial.



Compatibilisation par des copolymères à blocs (tensio-actifs)





COLLÈGE
DE FRANCE
—1530—

Comment fait la Nature ?



Le recyclage, une évidence pour la nature

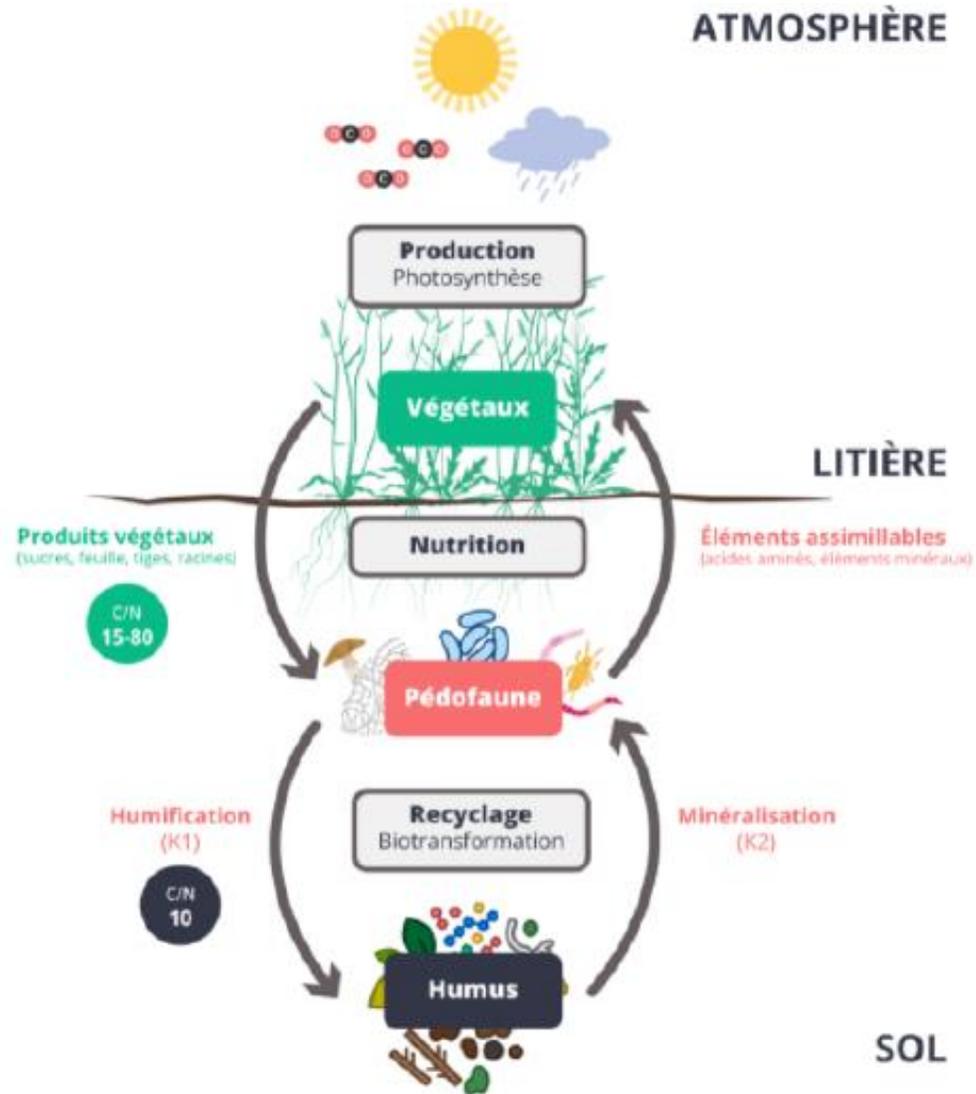
La nature gère les équilibres

Cycle du carbone

Cycle de l'azote

Cycle du phosphore

.../...





Le concept de bioremédiation:

- dépollution d'un milieu par l'action d'organismes vivants
- très prometteur et déjà appliqué dans les stations d'épuration
- prometteur aussi dans les sols, la phytoremédiation:
 - extraction de substances toxiques des sols grâce aux plantes hyperaccumulatrices (Claude Grison, DR CNRS)
 - plantes capables de survivre et de se développer dans des sols pollués par des métaux, et purifient leur environnement.
Exemple: on trouve en Nouvelle-Calédonie des arbres absorbant le nickel : leur sève est bleue !
- de nouvelles solutions de recyclage peuvent exister dans la Nature...



Le recyclage, une évidence pour la nature

La nature regorge d'exemples de recyclage efficace

Le ver de cire est capable de se nourrir de plastique ! Ces petits insectes d'à peine 1 à 2 cm de long peuvent digérer le polyéthylène en seulement 24h alors qu'il faudrait des siècles pour qu'il se dégrade naturellement. Ces vers ne constituent pas une solution miracle pour recycler les 4,5 millions de tonnes de déchets plastiques produits annuellement en France : dans une expérience que relate [National Geographic](https://www.nationalgeographic.fr/) il a fallu une semaine à une colonie de 60 larves pour digérer à peine 30 cm carré de plastique, soit même pas un petit sachet de bonbons !



Ces larves du papillon *Galleria mellonella*, aussi connu sous le nom de fausse teigne de la cire, ont acquis une renommée mondiale en 2017, lorsque leur incroyable capacité à manger du plastique a été découverte par hasard.

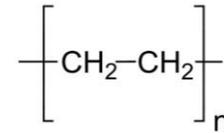


Le recyclage, une évidence pour la nature



Les chercheurs ont isolé certaines d'entre elles et constaté qu'elles pouvaient vivre plus d'un an avec un régime alimentaire composé exclusivement de plastique. « Nous pensons que le processus de dégradation du plastique repose sur un ensemble de bactéries, associées à certaines **enzymes intestinales**, explique Christophe LeMoine, biologiste à l'université de Brandon, au Canada.

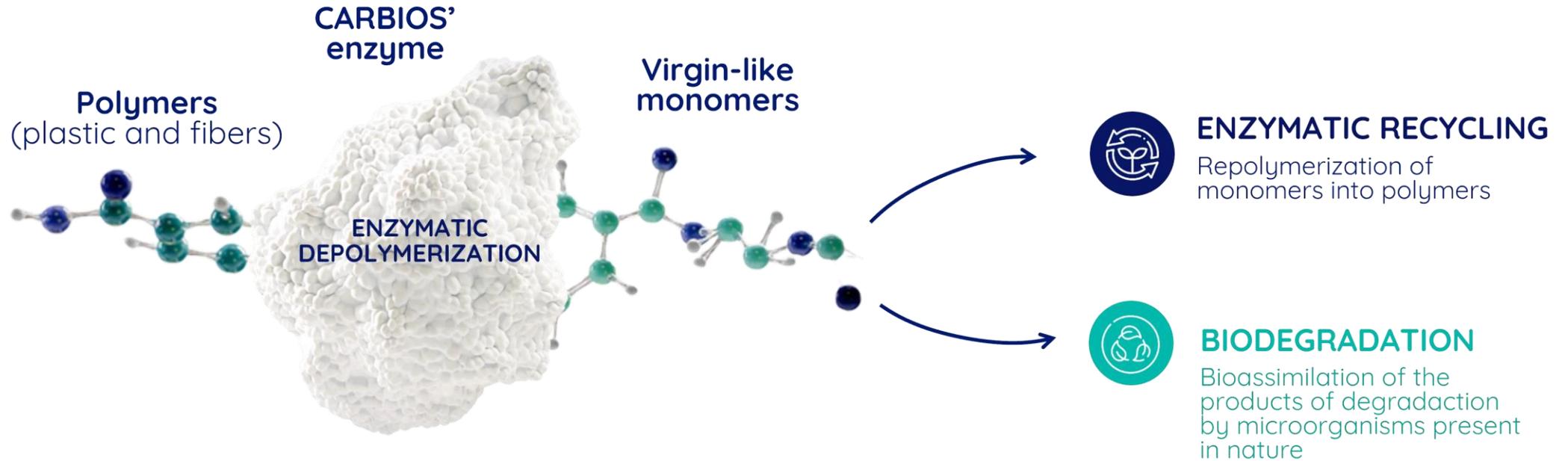
L'hypothèse est que ces chenilles, comme beaucoup d'autres larves d'insectes très voraces, se sont développées dans une niche écologique unique, en se nourrissant de molécules très complexes (la cire), ce qui les a probablement prédisposées à dégrader des polymères plastiques. »



Polyethylene

En isolant et en cultivant des bactéries intestinales avec le polyéthylène comme seule source de carbone pendant plus d'un an, des micro-organismes appartenant au genre *Acinetobacter* qui semblent impliqués dans ce processus de biodégradation ont été identifiées.

L'exemple de CARBIOS



Article

An engineered PET depolymerase to break down and recycle plastic bottles

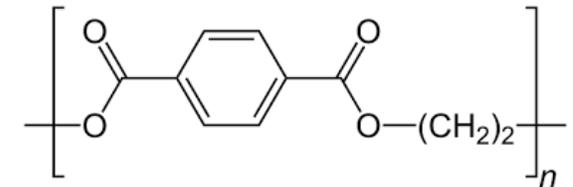
Nature 580, 216–219 (2020)

<https://doi.org/10.1038/s41586-020-2149-4>

Received: 27 June 2019

Accepted: 19 February 2020

V. Tournier^{1,4}, C. M. Topham^{1,4}, A. Gilles¹, B. David¹, C. Folgoas¹, E. Moya-Leclair¹, E. Kamionka¹, M.-L. Desrousseaux¹, H. Texier¹, S. Gavalda¹, M. Cot², E. Guémard³, M. Dalibey³, J. Nomme¹, G. Cioci¹, S. Barbe¹, M. Chateau³, I. André¹✉, S. Duquesne¹✉ & A. Marty^{1,3}✉



Article

An engineered enzyme embedded into PLA to make self-biodegradable plastic

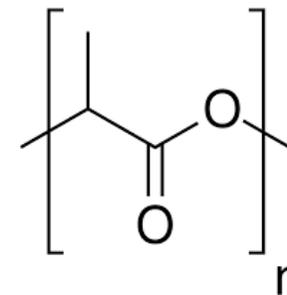
Nature 631, 884–890 (2024)

<https://doi.org/10.1038/s41586-024-07709-1>

Received: 4 May 2023

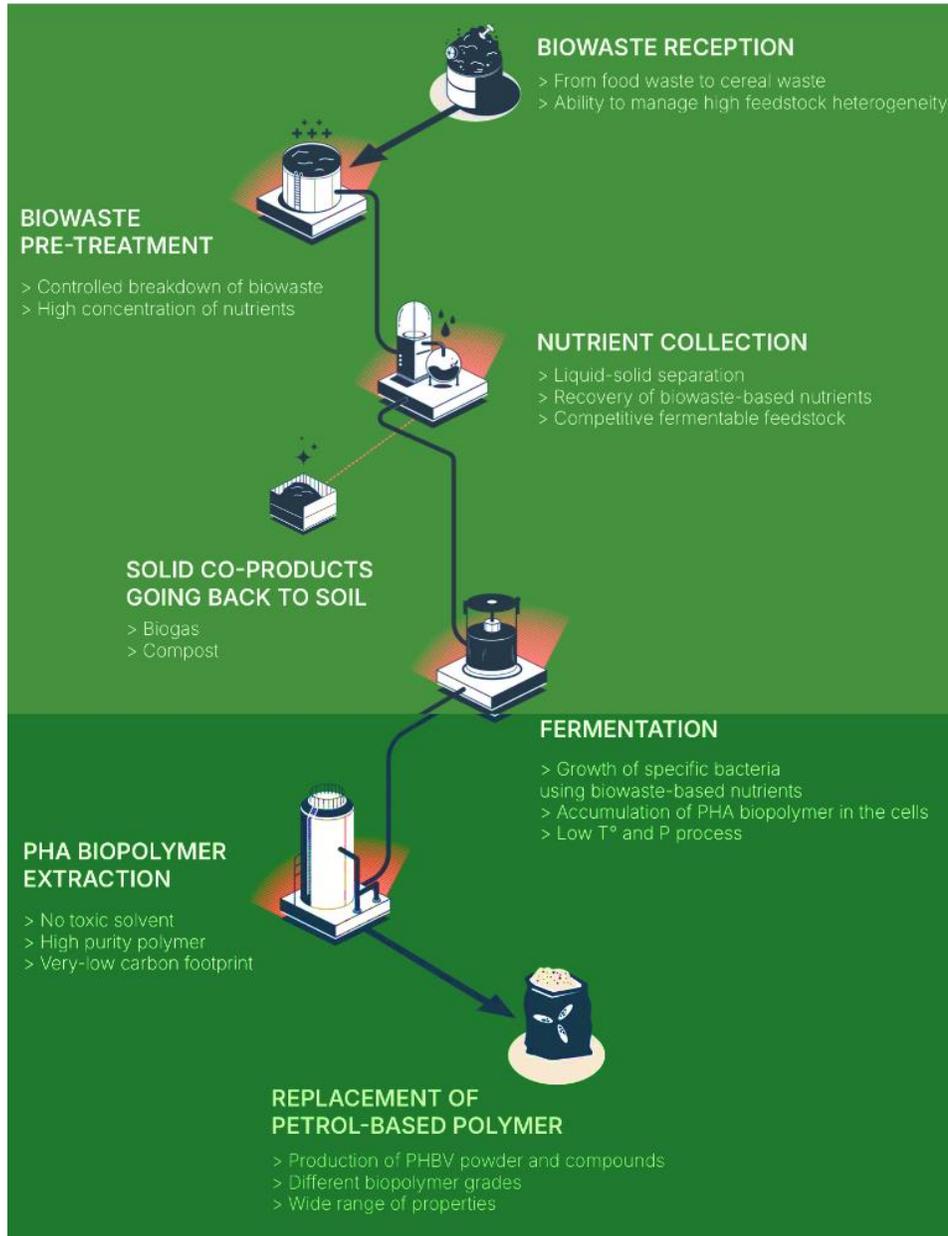
Accepted: 12 June 2024

M. Guicherd^{1,2,6}, M. Ben Khaled^{1,6}, M. Guéroult^{1,2,6}, J. Nomme¹, M. Dalibey², F. Grimaud²,
P. Alvarez¹, E. Kamionka¹, S. Gavalda^{1,2}, M. Noël³, M. Vuillemin¹, E. Amillastre¹, D. Labourdette¹,
G. Cioci¹, V. Tournier², V. Kitpreechavanich⁴, P. Dubois⁵, I. André¹✉, S. Duquesne¹ & A. Marty^{1,2}✉





L'exemple de DIONYMER



Product | Technology | Impact | Company [→ Contact](#)

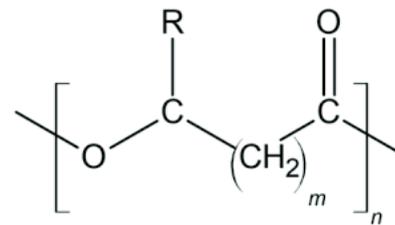
A 100% biobased and biodegradable polyester produced through fermentation

The first alternative to petroleum-based polymers derived from biowaste

We produce a **circular PHBV** - poly(hydroxybutyrate-co-hydroxyvalerate) in France.

They are a very promising family of naturally occurring polymers produced by bacteria and are the only polymers that are inherently biobased, biodegradable, biocompatible and home-compostable.

PRODUCT



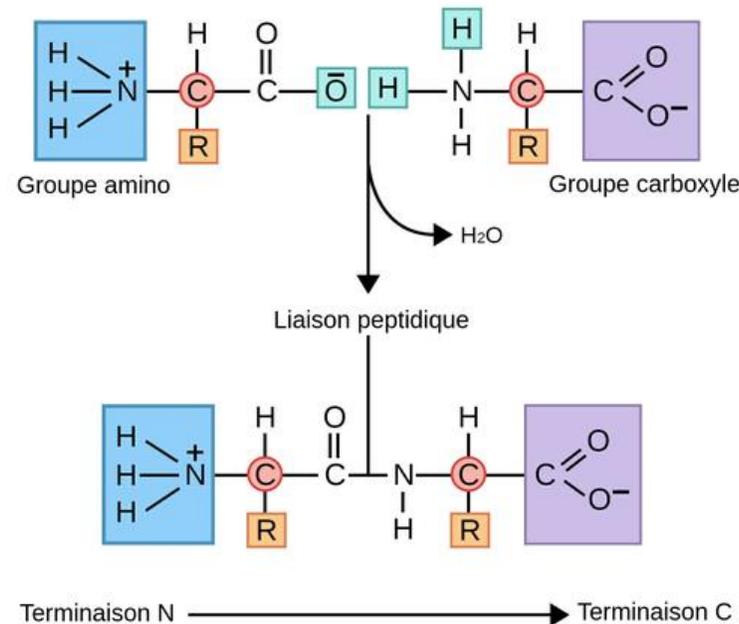


**Quels sont les polymères les plus
abondants dans la Nature?**

Recycler les plastiques à la manière des protéines

Les protéines sont sans cesse recyclées par les cellules afin d'en former de nouvelles. En effet, une fois que celles-ci ont rempli leur fonction, elles sont endommagées et il faut les remplacer. Lors de leur recyclage, les chaînes de protéines sont décomposées en acides aminés puis de nouvelles chaînes sont assemblées pour faire des nouvelles protéines !

Ce principe peut être appliqué à des polymères synthétiques comme les plastiques, permettant de les recycler entièrement !



Le recyclage, une évidence pour la nature

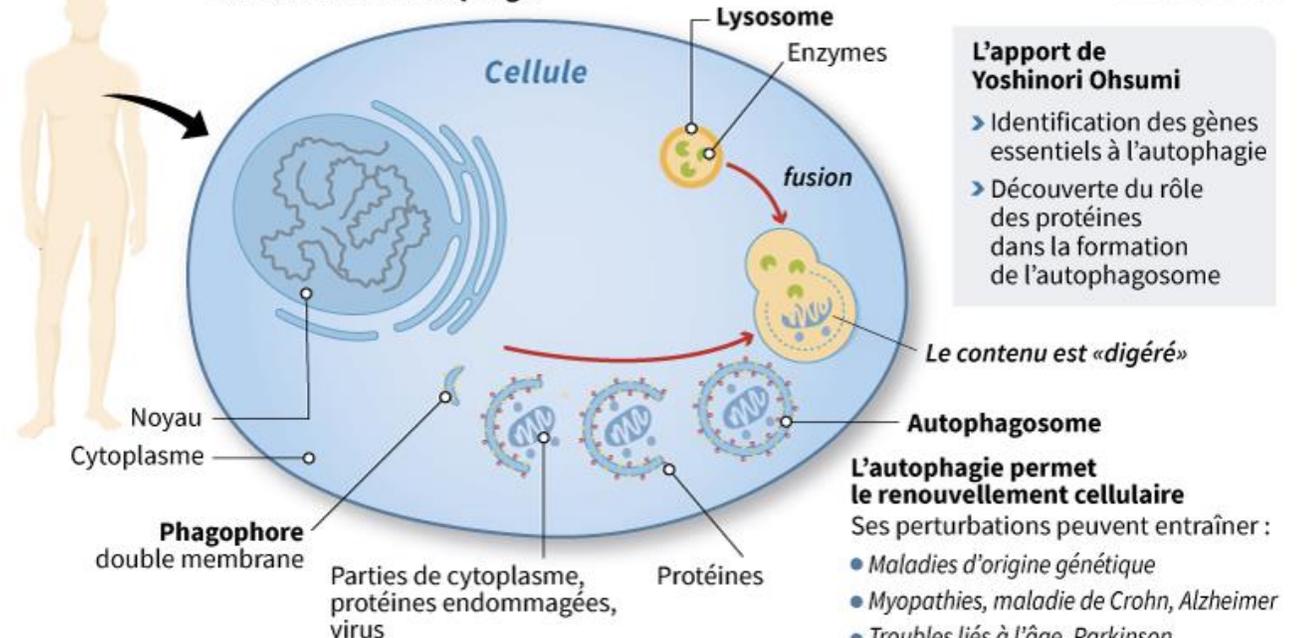
L'autophagie (du grec αυτο, « soi-même », et φαγειν, « manger »), autolyse ou autophagocytose: mécanisme physiologique, intracellulaire, de protection et de recyclage d'éléments cellulaires : les organites indésirables ou endommagés, un pathogène introduit dans la cellule, des protéines mal repliées... sont ainsi collectés et transportés vers les lysosomes pour être dégradés. Une partie du cytoplasme est ainsi recyclée par ses propres lysosomes. Ce mécanisme est aussi une source d'énergie et d'acides aminés en conditions stressantes pour la cellule, comme l'hypoxie, le manque de nutriments (jeûne) ou l'exposition à des traitements médicamenteux



«L'usine de recyclage» des cellules

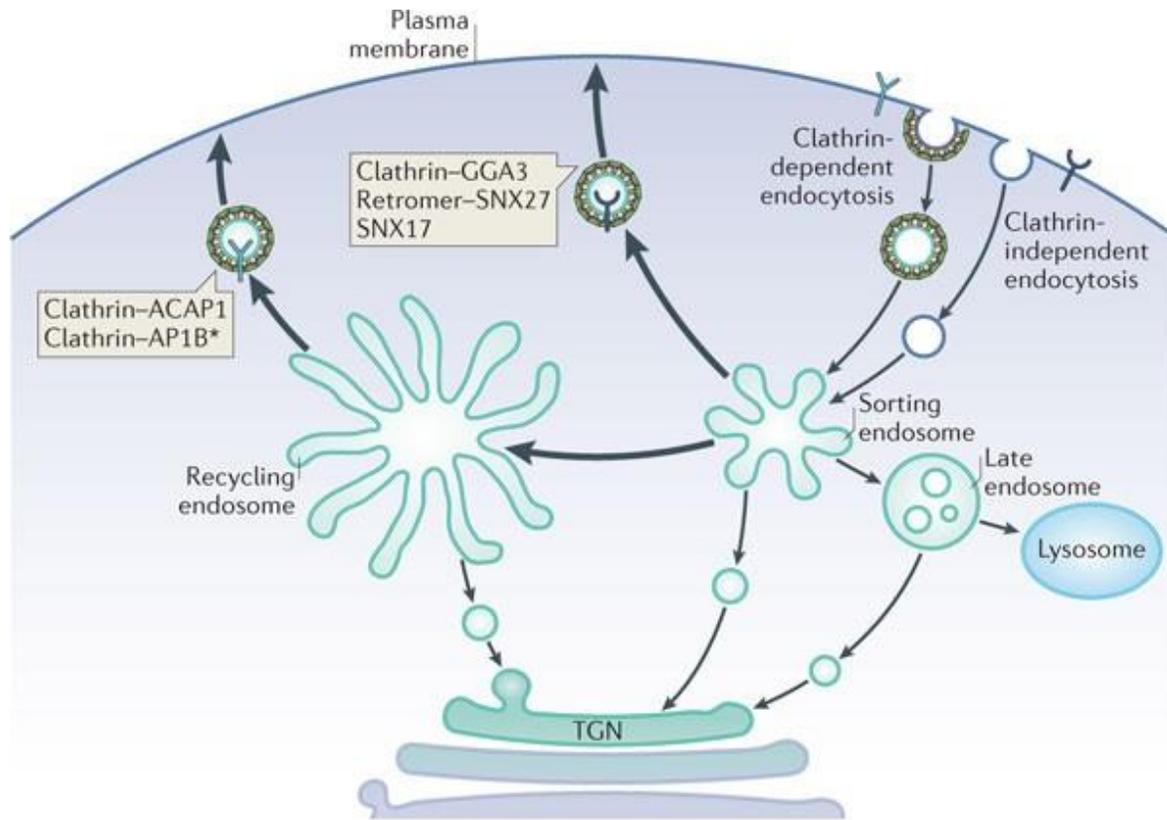
Les découvertes du Japonais Yoshinori Ohsumi permettent de mieux comprendre le processus d'autophagie

Le mécanisme d'autophagie



© AFP Source : Nobelprize.org

Le recyclage, une évidence pour la nature



Nature Reviews | Molecular Cell Biology

Le recyclage endocyttaire est essentiel à de nombreux processus cellulaires tels que l'absorption des nutriments, la signalisation intracellulaire, la polarité cellulaire, l'adhésion et la migration.

Longtemps considéré comme un mécanisme passif, ce recyclage repose en réalité sur un tri actif des protéines, impliquant des signaux de tri spécifiques et des complexes de revêtement.

Le recyclage peut s'effectuer depuis les endosomes de tri ou via les endosomes de recyclage, avec des voies distinctes.



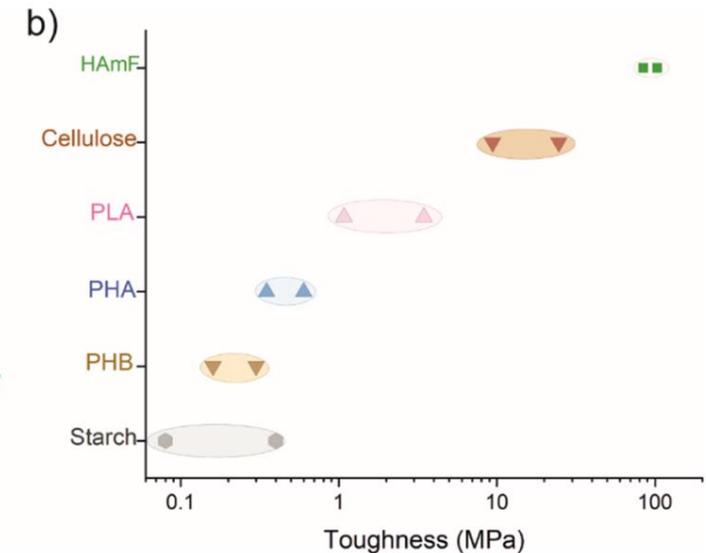
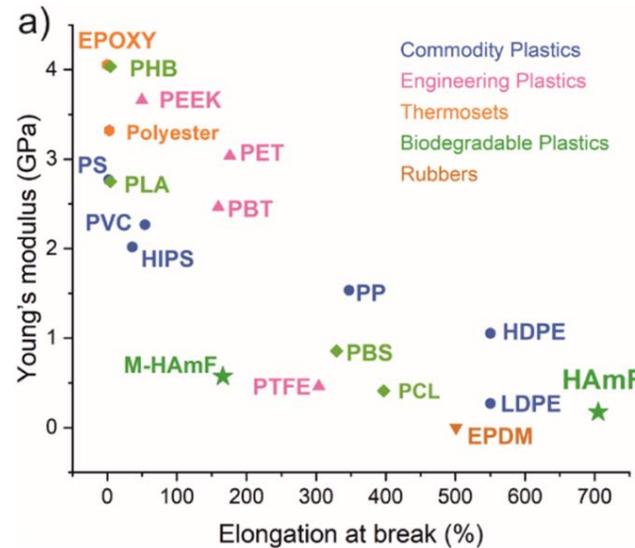
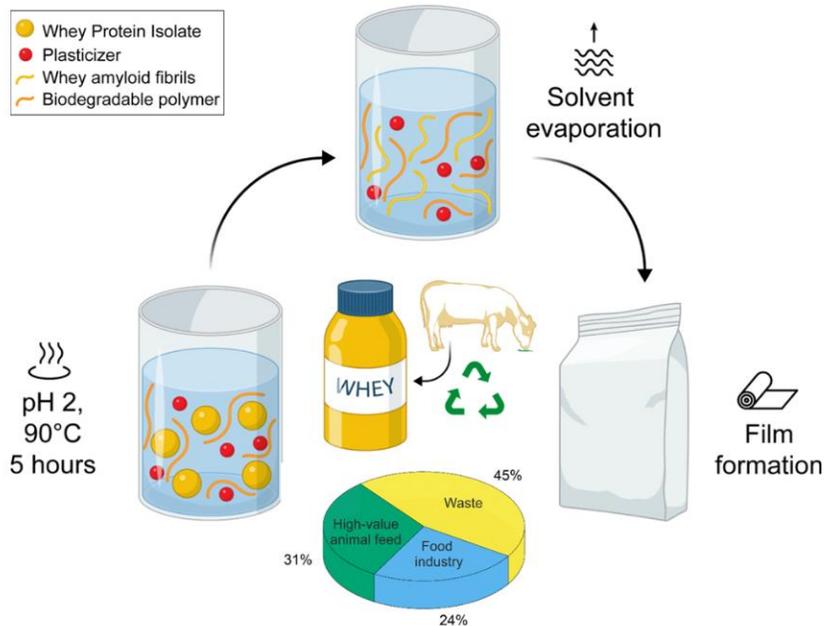
COLLÈGE
DE FRANCE
—1530—

Quelques exemples récents et « emblématiques »

Mezzenga (ETH)

ACS Sustainable Chem. Eng. 2021, 9, 35, 11916–11926

La fibrillation in situ du monomère de **lactosérum**, choisi ici comme protéine modèle issue des déchets de l'industrie agroalimentaire, a été réalisée en présence d'un plastifiant et de plastiques biodégradables tels que le PVA et la MC. Les films obtenus étaient transparents, robustes, flexibles et résistants, présentant une stabilité à l'eau acceptable ainsi que de bonnes propriétés barrières pour des applications dans l'emballage alimentaire.



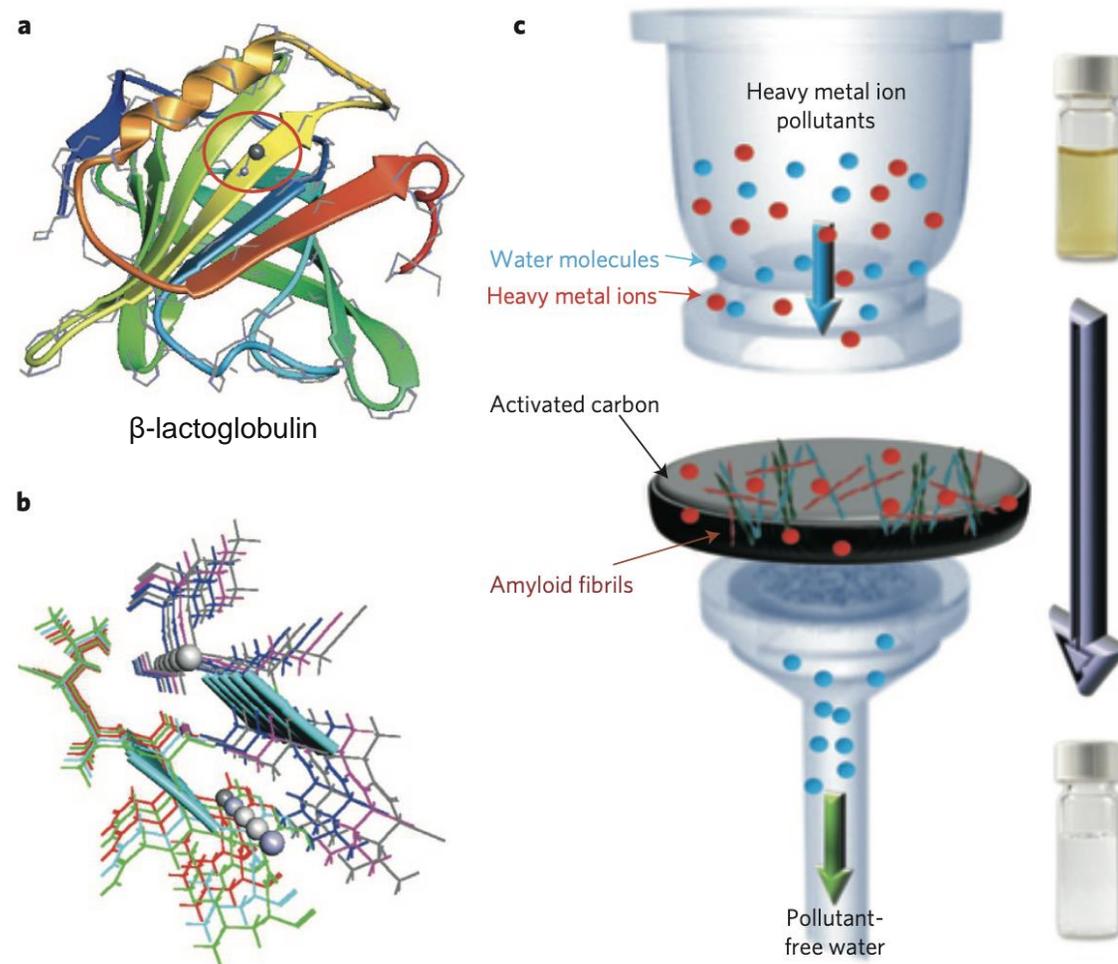
Le modèle des protéines

Mezzenga (ETH)

Nature Nanotech. 2016

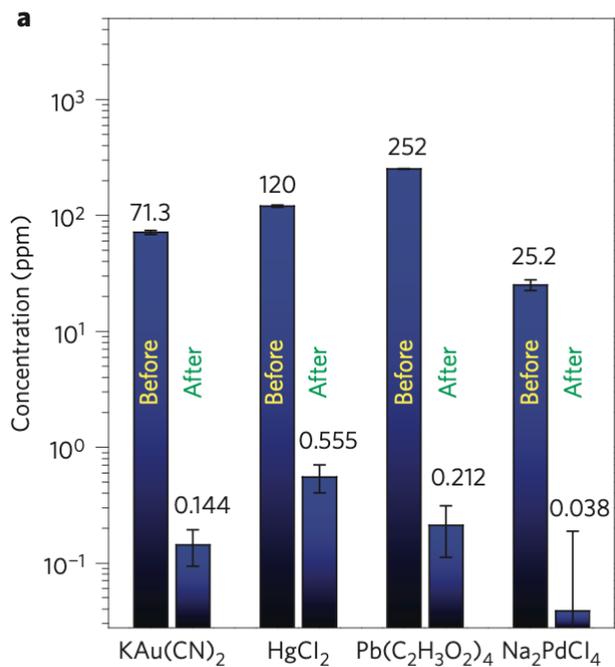
Des preuves indirectes suggèrent un rôle potentiel des **fibrilles amyloïdes dans l'élimination des ions métalliques lourds toxiques** (avec des implications dans la formation des fibrilles amyloïdes observées dans les maladies neurodégénératives).

Nature Chem. 6, 303–309 (2014).

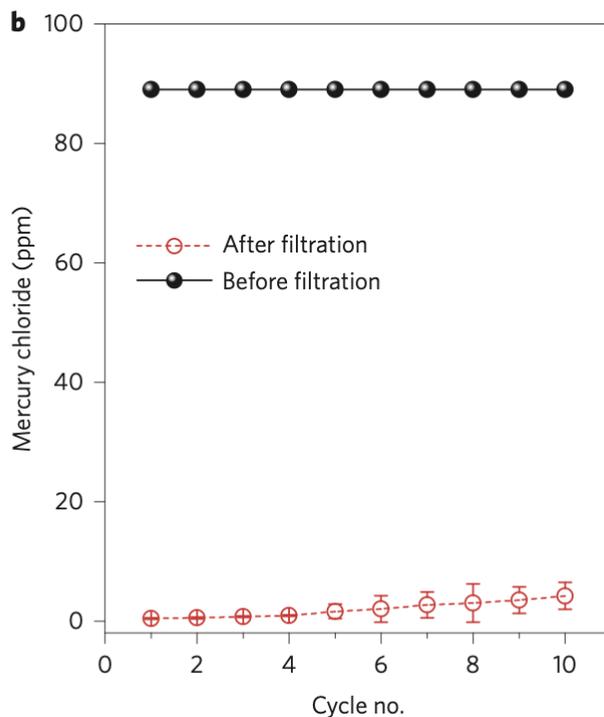


Mezzenga (ETH)

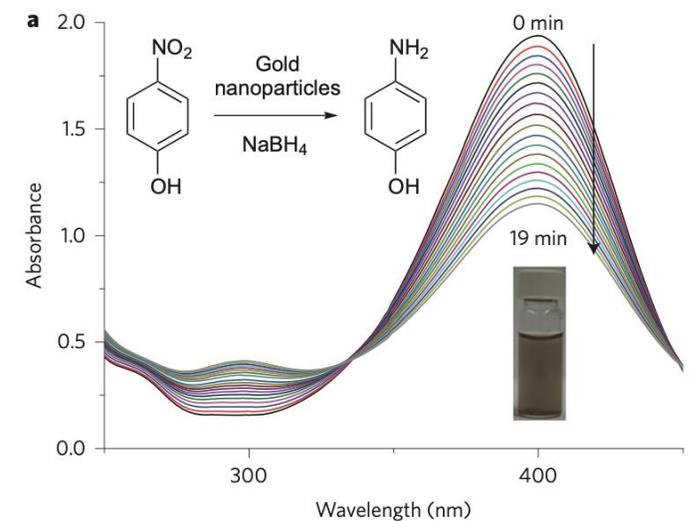
Nature Nanotech. 2016



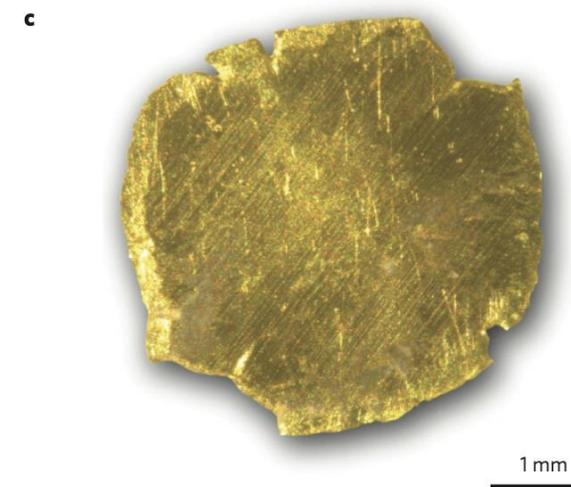
Filtration de différents ions métalliques toxiques



Plusieurs cycles possibles



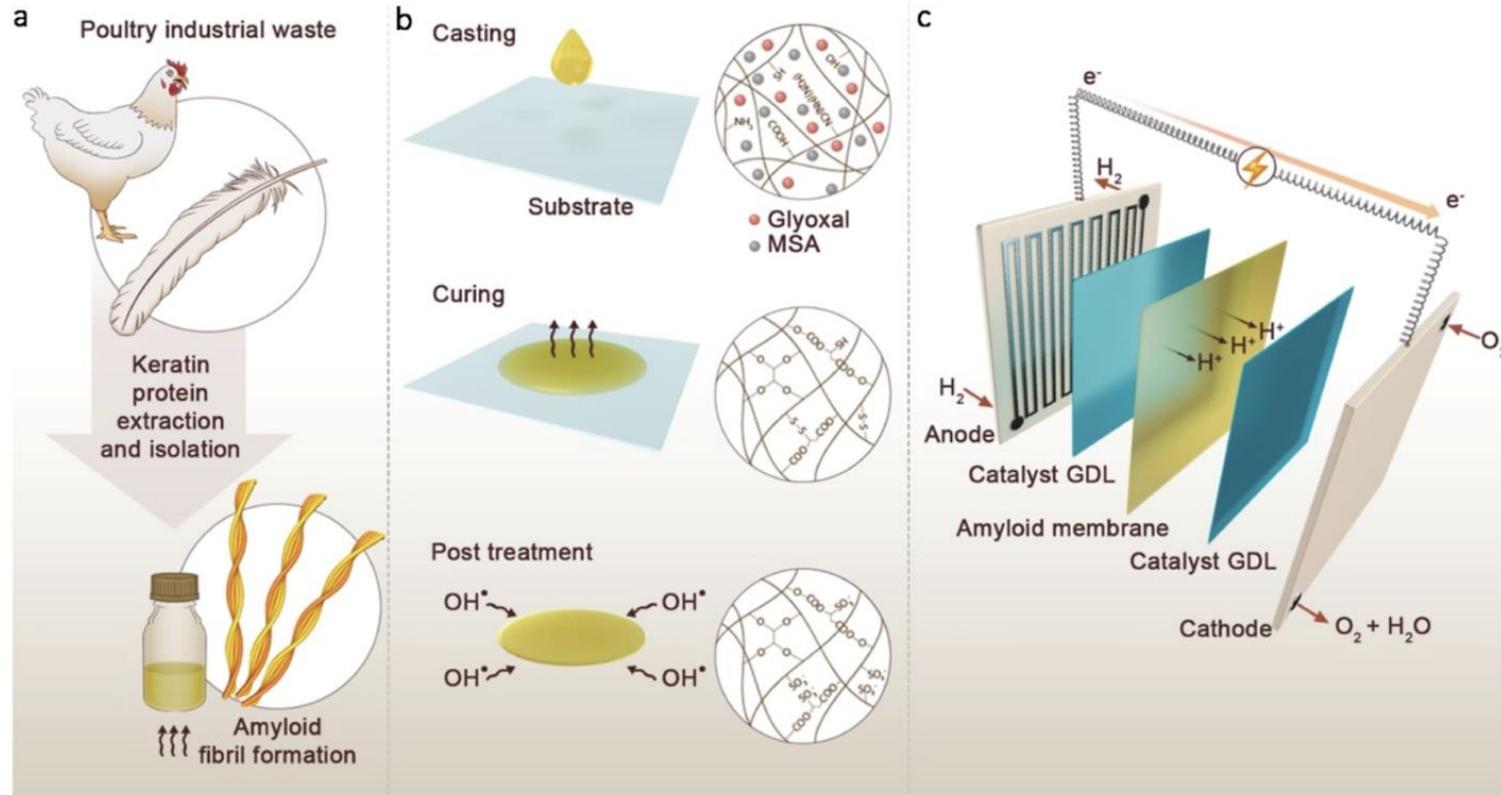
Performance catalytique de NP d'or



Formation de films d'or

Mezzenga (ETH)

ACS Appl. Mater. Interfaces 2023,15,47049–47057



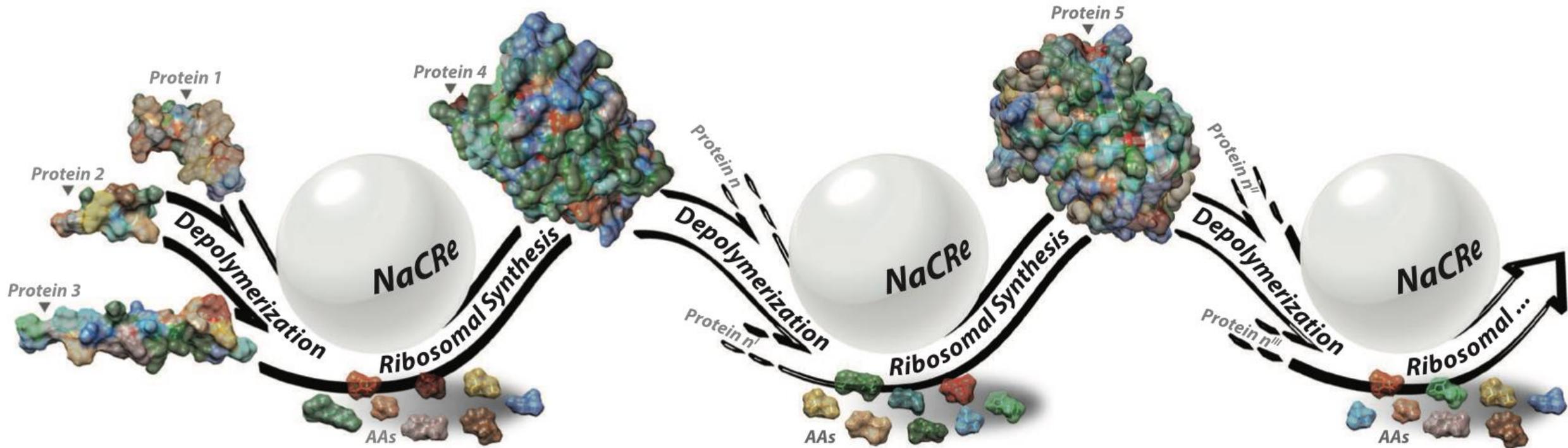
Membranes de kératine à base d'amyloïdes dans une pile à hydrogène pour alimenter divers dispositifs, en n'utilisant que l'hydrogène et l'air comme sources d'énergie.

Bien que la **conductivité protonique** et les **performances** des membranes de kératine soient respectivement **10 à 20 fois inférieures** à celles des matériaux commerciaux de référence (**Nafion** ou **l'Aquivion**), elles présentent un **profil environnemental et de durabilité radicalement différent**.

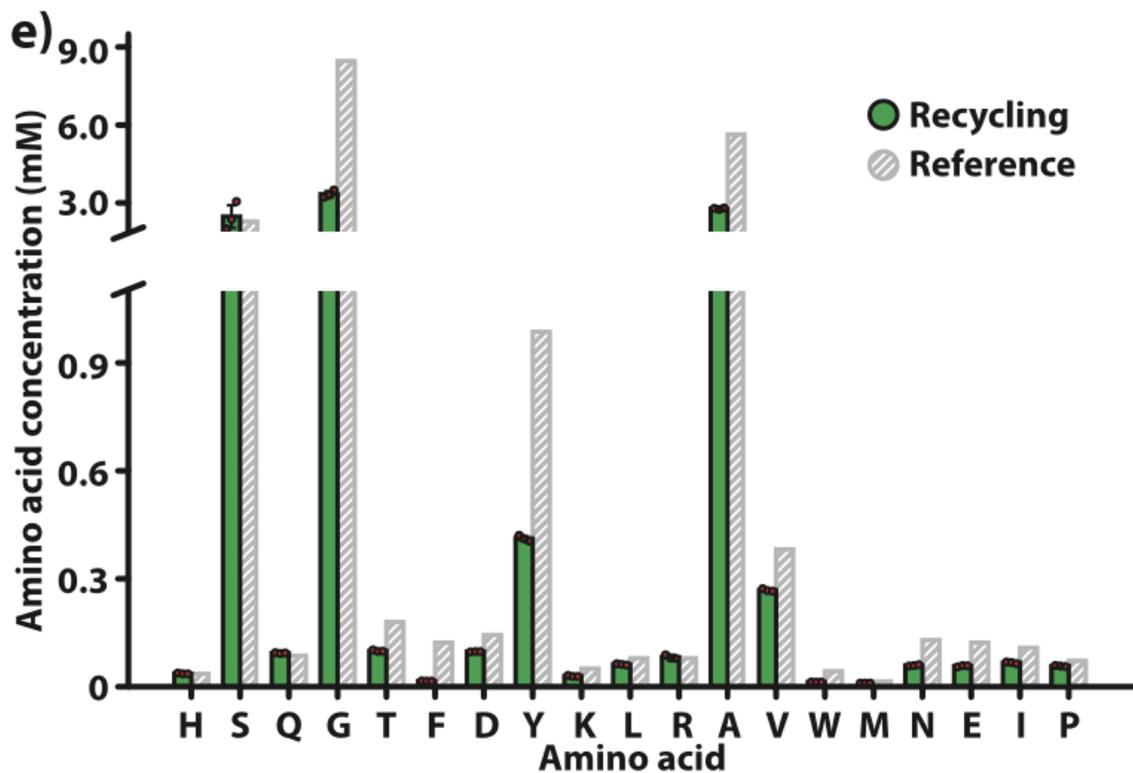
Coût total de production estimé: depuis les matières premières jusqu'à la membrane, environ **850 USD·m⁻²** (deux fois inférieur à celui du Nafion (1 500 à 3 000 USD·m⁻²)) et devrait **diminuer avec le passage à l'échelle et l'optimisation**.

Le modèle des protéines

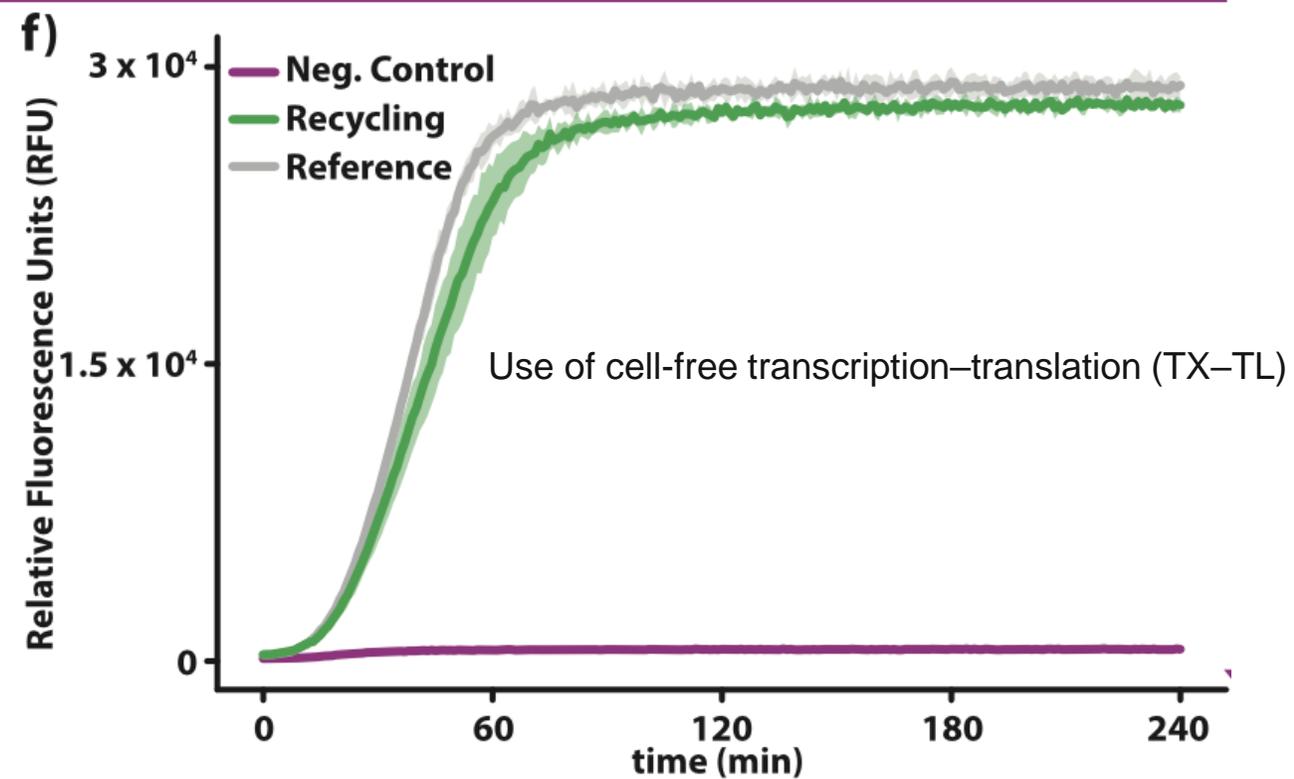
Nature-inspired Circular-economy Recycling (NaCRe) for Proteins



Depolymerization of fibroin (silk)



Recycling of silk into GFP

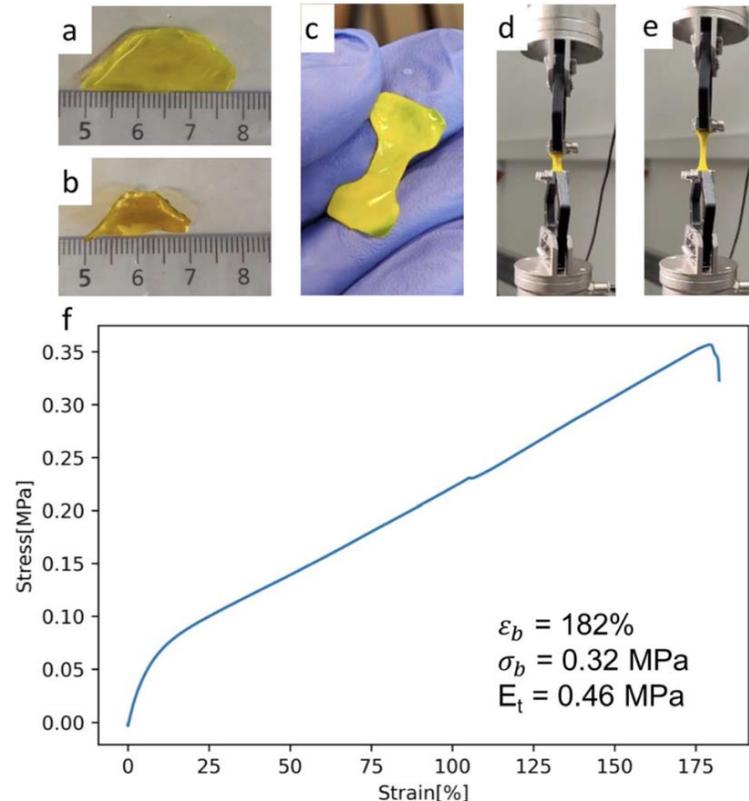
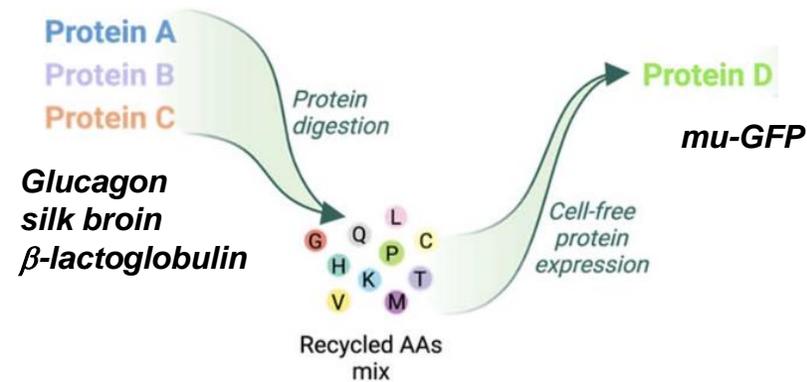


Le modèle des protéines

Stellacci (EPFL)

RSC Sustainability, 2024, 2, 2903–2909

« En 2070, le monde comptera 11 milliards d'habitants et près de 600 millions de tonnes de plastique pourraient être produites chaque année. Même si tous les polymères étaient biosourcés et biodégradables, il resterait un énorme défi à relever en termes de durabilité, tant au niveau de l'approvisionnement que de l'élimination. L'humanité doit s'orienter vers les principes d'une économie circulaire, où les matériaux, une fois produits, restent utilisés le plus longtemps possible, en taxant la Terre le moins possible. »



- Produire de plus grandes quantités
- Volume de digestion augmenté de 500 mL à 10 L.
 - Concentration du mélange protéique augmentée de 1 à 5 mg·mL⁻¹.
 - Passage de l'expression dans le système TXTL à une expression dans un lysat cellulaire
 - Production protéique augmentée de ~1 mg à 10 mg
 - Coût réduit de 19 000 € à 1 500 € par mg de protéine purifiée recyclée

Conclusions et quelques messages...

La population mondiale devrait atteindre 10 milliards d'habitants d'ici 2050

Un des défis les plus redoutables en matière de durabilité: traitement de tous les produits plastiques

9 milliards de tonnes de plastiques produits jusqu'en 2021¹

4 à 12 millions de tonnes de matières plastiques dans les océans par an²

Recyclage/surcyclage des plastiques issus du pétrole: pas de solution unique

L'approche biosourcée

La nature produit encore plus polymères naturels, mais ils sont durables (polysaccharides, protéines)

Les protéines sont des polymères naturels qui sont constamment recyclés (déchets = nutriments)

1- Yuan, L.; Buzoglu Kurnaz, L.; Tang, C. Alternative Plastics. Nat. Sustain. 2021, 2021, 1–2.

2- Brooks, A. L.; Wang, S.; Jambeck, J. R. The Chinese Import Ban and Its Impact on Global Plastic Waste Trade. Sci. Adv. 2018, 4, No. eaat0131.

Colloque Biomatériaux de demain : Polymères Biomimétiques et Biohybrides

Chair: Sébastien Lecommandoux; co-Chair: Clément Sanchez

Conférenciers invités:

Patrick Couvreur (IGPS, Univ. Paris Saclay, France)

Tim Deming (UCLA, Los Angeles, USA)

Jan van Hest (TUE, Eindhoven, Pays-Bas)

Kazunori Kataoka (iCONM, Tokyo-Kawasaki, Japon)

Harm Anton Klok (EPFL, Lausanne, Suisse)

Sébastien Lecommandoux (LCPO Bordeaux, France)

Raffaele Mezzenga (ETH Zurich, Suisse)

Molly Stevens (Univ. Oxford, UK)

Sam Stupp (Northwestern Univ, USA)

Maria Vicent (CIPF, Valence, Espagne)



COLLÈGE
DE FRANCE
—1530—

Conférenciers du jour



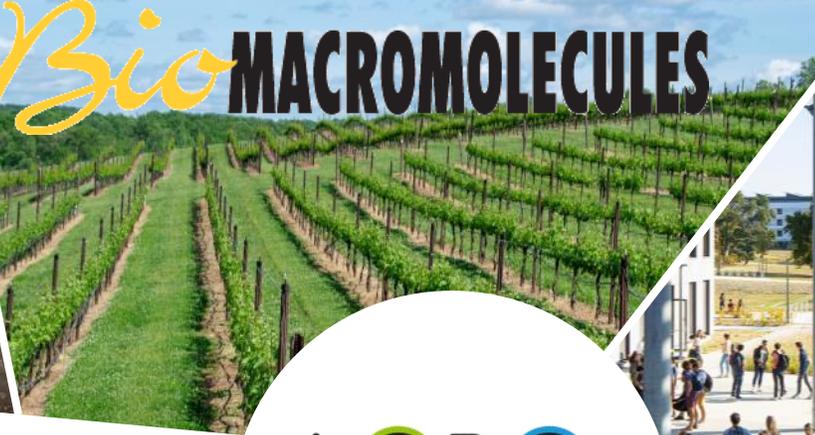
**CHRISTOPHE
CHASSENIEUX
(Univ. Le Mans)**



**DANIEL TATON
(Univ. Bordeaux)**



BioMACROMOLECULES



MERCI



COLLÈGE DE FRANCE 1530

Lab retreat, May 2024