

# Concevoir des plastiques recyclables

## Recycler les plastiques

### Elaborer de nouveaux plastiques biosourcés

Une offre de compétences  
des instituts Carnot  
en direction des entreprises

pour construire ensemble  
des partenariats de  
Recherche & Développement & Innovation



**1<sup>er</sup> & 2<sup>e</sup> JUILLET 2021**

AU MINISTÈRE DE LA  
TRANSITION  
ÉCOLOGIQUE  
OU R. BASTANCE

EN VISIO

RDV  
PROGRAMMÉS  
EN B2B

2<sup>ÈME</sup> ÉDITION

## RENCONTRE ECOTECH PLASTIQUES ET EMBALLAGES

Innovations et ruptures technologiques

ÉCO-CONCEPTION | BIOSOURCÉS | RECYCLAGE | RESSOURCES

Un éventail de compétences en Recherche & Développement des instituts Carnot  
proposé à l'occasion de la Rencontre Ecotech « Plastiques et Emballages »  
organisée le 1er-2 juillet 2021 par



Partenaires de la rencontre



La mission des instituts Carnot est de développer les partenariats entre acteurs de la recherche publique et entreprises afin de répondre par l'innovation aux enjeux économiques et sociétaux du monde actuel.

Créé par le ministère en charge de la Recherche en 2006, le label « institut Carnot » distingue des équipes de recherche de haut niveau qui sont les plus fortement engagées dans une stratégie d'ouverture et de partenariat avec les entreprises. Implantées dans les diverses régions, ces équipes représentent 20% des effectifs de la recherche publique française. Elles appartiennent à tout l'éventail des institutions de recherche : centres de recherche, universités, écoles d'ingénieurs, centres techniques industriels et agricoles...

Parmi les 39 instituts Carnot, qui couvrent un vaste ensemble des domaines de recherche (ingénierie, énergie, environnement, santé, agriculture, numérique...), 14 participent au présent recueil de compétences sur les plastiques et leur recyclage, et sur les nouveaux matériaux polymères biosourcés.

L'objectif des instituts Carnot, à l'occasion des événements et rencontres avec les entreprises, est, d'une part, d'appréhender précisément et concrètement les besoins et attentes des entreprises en matière de développement technologique, et d'autre part, de faire connaître leurs compétences de R&D qui peuvent être mobilisées en soutien des démarches d'amélioration et d'innovation des entreprises.

*Pour plus d'informations sur les instituts Carnot ou sur les offres présentées dans ce recueil, n'hésitez pas à prendre contact à l'Association des instituts Carnot avec [jacques.larrouy@aicarnot.fr](mailto:jacques.larrouy@aicarnot.fr) 06 79 11 14 41*

*Les chercheurs ou responsables des relations industrielles des instituts Carnot participent aux rendez-vous B2B de la Rencontre Ecotech « Plastiques et Emballages ». Prenez directement contact avec eux à travers la plateforme de prise de rendez-vous de l'événement.*



## *Sommaire*

### **Analyses et traitements des plastiques**

Pages 6 à 12

### **Le 100% biosourcé**

Pages 14 à 23

### **Optimisation des procédés et nouveaux procédés**

Pages 26 à 32

### **Autres offres de compétences**

Pages 34 et 35

### **Annexe : les Instituts Carnot participants**



© Richard Villalon

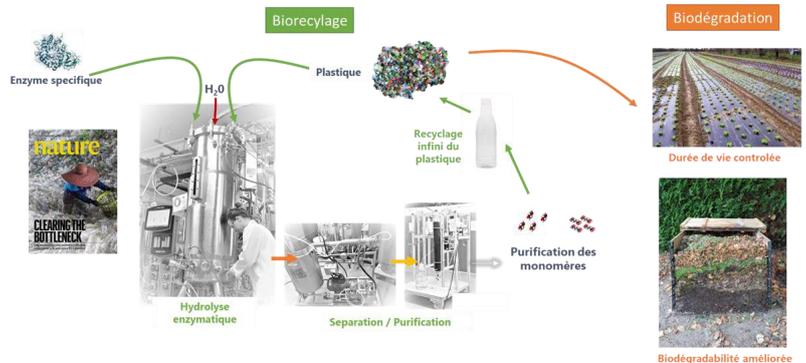
# **Analyses et traitements**

## Déformulation du plastique

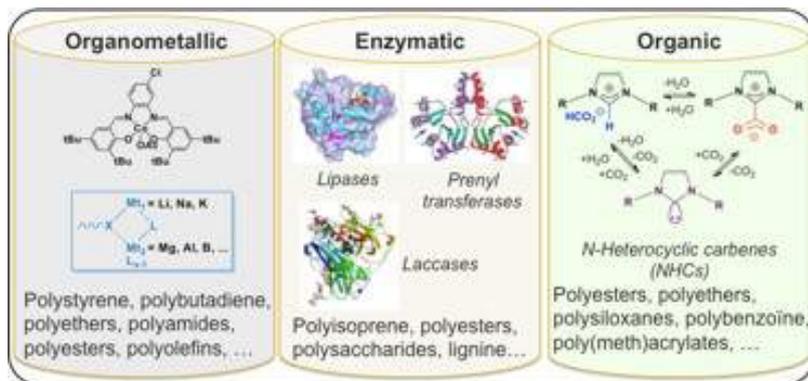
Les biocatalyseurs enzymes et microorganismes permettent de synthétiser ou de dépolymériser les plastiques de type polyester, polyuréthane, polyamide... Notre halle technologique permet de conduire des projets depuis la preuve de concept jusqu'au scale-up pré-industriel, en passant par la production de lots de démonstration.

L'utilisation de biocatalyseurs permet :

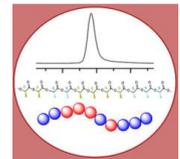
- d'avoir une sélectivité de substrat dépolymérisé dans le cadre de mélange complexe de plusieurs polymères,
- de ne pas utiliser de solvant. Les procédés sont peu énergivores car à faible température et faible pression,
- d'être compatible avec un rejet dans l'environnement de polymères biodégradables.



## Catalyse de (dé) polymérisation



Développement de différentes catalyses pour une polymérisation ou une dépolymérisation contrôlée.



Catalyse organique, catalyse enzymatique, catalyse organométallique.

Tout secteur des matériaux polymères et formulation (cosmétique, vernis, peintures, élastomères, ...)

## Etudes de vieillissement



Le Carnot Cetim, acteur majeur historique dans l'analyse de défaillance, est positionné dans la caractérisation des polymères et des composites, en particulier en s'appuyant sur les moyens de sa filiale ETIM.

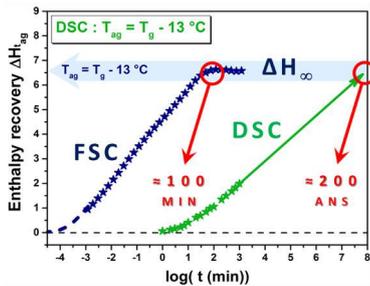
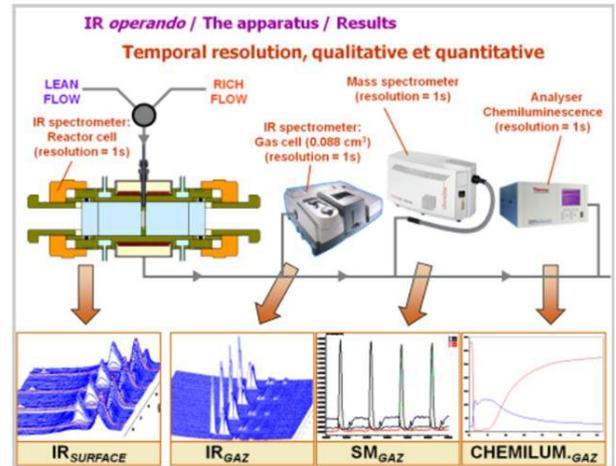
Il propose une large panoplie d'essais de caractérisation des plastiques : physico-chimie, mécanique statique et dynamique (fatigue). Il met régulièrement en place de nouveaux essais pour valider des caractéristiques spécifiques à un besoin.

Le Carnot Cetim propose une analyse paramétrique de l'évolution des propriétés d'une pièce (mécanique statique, fatigue, tenue chimique ...) en fonction de la proportion de matière plastique recyclée incorporée. Le savoir-faire en matière d'analyse de défaillance (fractographie, coupe micrographie, tomographie RX) permet de proposer une réponse très complète.



Le Laboratoire Catalyse et Spectrochimie (LCS) est spécialisé dans la caractérisation des matériaux, catalytiques notamment, au plus proche de leurs conditions de travail (températures et pressions variables, sous flux ou sous vide...) par spectroscopie operando. Cela permet de suivre l'évolution des matériaux au cours du temps, les interactions avec sa surface ou la diffusion des gaz à travers les solides poreux, car ces systèmes sont aussi équipés d'analyseurs des gaz.

L'expérience du LCS dans les phénomènes catalytiques, de l'adsorption, de la diffusion, permet de comprendre et améliorer les catalyseurs de déformulation, y compris en cours de fonctionnement, mais aussi la perméation de contaminants extérieurs à travers les emballages.



Notre expertise nous permet de caractériser tout type de vieillissement grâce à notre parc expérimental mais aussi d'analyser, interpréter voire prédire un vieillissement particulier associé aux dynamiques des chaînes polymères, le vieillissement physique.

Collaborations type : recherche, mise en œuvre et caractérisation de matériaux biosourcés pour remplacement de pièces en plastique pétrosourcé ; évaluation des performances de polymères pour les secteurs de l'emballage, l'automobile, l'habillement, etc.

Le parc instrumental du Groupe de Physique des Matériaux (équipe EIRCAP) rend possible l'accès à un grand nombre de propriétés thermiques, diélectriques, mécaniques et optiques. Des méthodes empiriques prédictives et de vieillissement accéléré peuvent alors être mises en place notamment pour les polymères thermoplastiques et thermodurcissables, les biopolymères polylactides, PLA et polyhydroxyalcanoates, PHAs, les fibres...

Analyse des produits de dégradation par comparaison des spectres à deux dimensions.



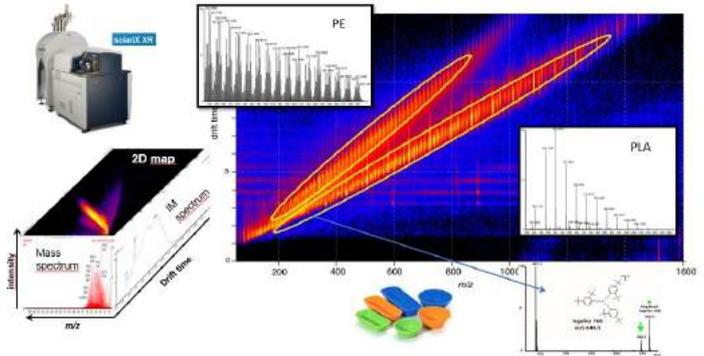
Etude de vieillissement physique ou physico-chimique.

Compréhension et prédiction des mécanismes de dégradation ou la stabilité du matériau.

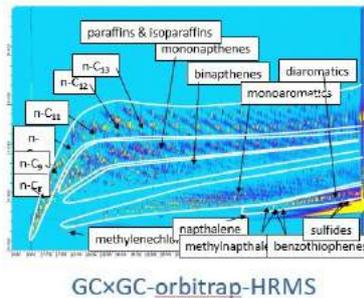
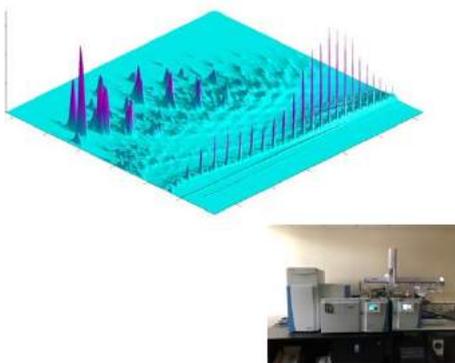


L'analyse par ultra masse permet également de démontrer la formation de métabolites ou produits de dégradation qui peuvent apparaître lors des études de vieillissement en comparant les spectres à deux dimensions. Par cette méthode les mécanismes de dégradation ou la stabilité du matériau dans le temps ou après un traitement peuvent être ainsi compris et prédit. Des vieillissements physique et physico-chimique liés à la température, l'humidité, aux cycles thermiques, au rayonnement UV ou à l'oxygène sont possibles.

Le Carnot I2C a un équipement unique en Europe qui permet de déformuler des matrices complexes comme du plastique et des emballages en utilisant un appareil d'ultramasse couplé à une mobilité ionique. Cette analyse permet d'obtenir une cartographie de la composition de l'échantillon sous sa forme brute sans aucune préparation préalable. La masse moléculaire avec une précision de 6 chiffres après la virgule permet d'analyser les polymères et de détecter par exemple des stabilisants à l'état de traces autour de 50 ppb.



Chromatographie compréhensive 2D

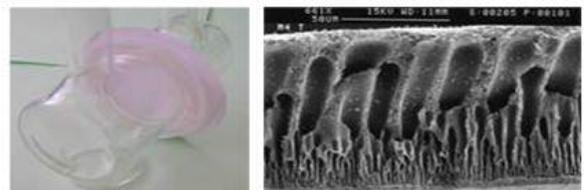
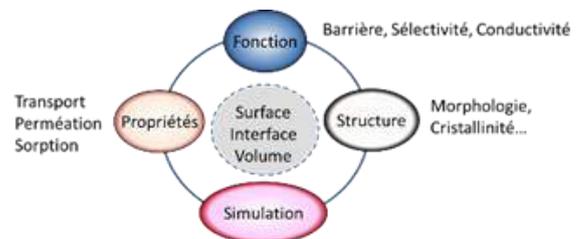


GCxGC-orbitrap-HRMS

Le Carnot I2C réalise de la chromatographie gazeuse à deux dimensions en utilisant un modulateur qui permet de coupler deux colonnes différentes faisant ainsi apparaître la composition d'une matrice complexe sur deux axes permettant par exemple d'identifier la nature des polluants et contaminants présents à l'état de traces par spectrométrie de masse.

Les chimistes du Carnot I2C peuvent analyser et améliorer les propriétés barrières de vos emballages et polymères. Nous développons des supports avec des perméabilités contrôlées sur des entrants ou sortants comme H<sub>2</sub>O, H<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O+O<sub>2</sub>, organiques, mélange à l'état vapeur ou liquide. Nous pouvons modéliser les étapes de vieillissement et ainsi prédire la stabilité des supports.

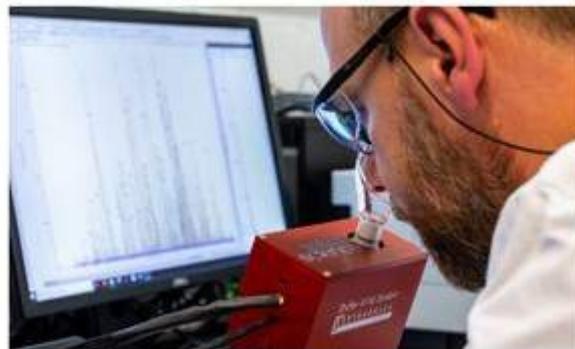
Il est possible de détecter les contaminants présents dans une matrice complexe polymérique en utilisant des bases de données qui référencent des composés par leur masse moléculaire. Nous proposons des analyses qualitatives et quantitatives des composés à l'état de traces issus de migration, contamination ou dégradation.



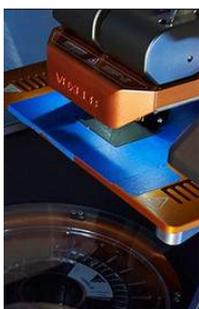
## Institut Carnot I2C URCOM

L'institut Carnot I2C a une expertise reconnue en cosmétique et réalise des analyses physico-chimiques et des évaluations sensorielles. Nous développons l'analyse olfactive en utilisant Le Champ Des Odeurs® et utilisons des sondes volatiles pour l'étude des interactions. Les composés responsables des mauvaises odeurs lors de la production ou du recyclage sont identifiés, expliqués et éliminés. En corrélant les résultats d'analyses et le sensoriel, nous proposons des prédictions. I2C peut vous proposer des études structures/propriétés et en particulier sur les interactions odeurs ou touché/supports.

## Détection et élimination des odeurs



## Institut Carnot Ingénierie@Lyon CT IPC



- Applications : Pièces techniques, emballages rigides et souples, pièces plastiques...
- Secteurs de marchés : Industrie, Agroalimentaire, Cosmétique, Jouets, Puériculture...

- Identification de substances présentes dans les pièces plastiques en lien avec la réglementation des différents secteurs de marché.
- Contrôle qualité sur des produits plastiques.
- Recherche de la présence de substances néoformées liées au procédé de transformation.
- Accompagnement à la réalisation des dossiers réglementaires.
- Accompagnement à la mise en place de contrôles et de validation de méthodes analytiques sur sites.

- Laboratoire industriel doté des dernières technologies en termes de recherche de substances (chromatographie liquide et gazeuse, spectrométrie UV, IRTF...)
- Expertise dans le secteur de l'emballage
- Forte Connaissance et Expertise des métiers de la plasturgie : matières, procédés, design, réglementaire.

## Institut Carnot Ingénierie@Lyon CT IPC

- Validation des interactions avec le contenu par des tests laboratoires.
- Simulation des interactions avec le contenu (safe design).
- Etude de la stabilité avec les produits contenus.
- Accompagnement à la réalisation des dossiers réglementaires.
- Accompagnement à la mise en place de contrôles et de validation de méthodes analytiques sur sites.

- Applications : contenants techniques, emballages rigides et souples, pièces plastiques...
- Secteurs de marchés : industrie, agroalimentaire, cosmétique, jouets, puériculture...

## Test de migration de substances



- Laboratoire industriel doté des dernières technologies en termes de tests de migration et interaction contenant/contenu
- Expertise dans le secteur de l'emballage
- Forte Connaissance et Expertise des métiers de la plasturgie : matières, procédés, design, réglementaire.

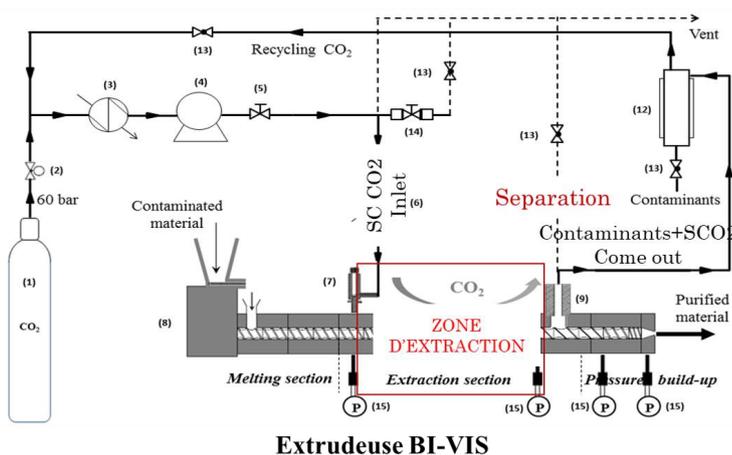
Réalisation de tests d'usage pour identifier la sensorialité des emballages et les inerties sensorielles possibles avec le contenu.



- Applications : Emballages rigides et souples, jouets, puériculture...
- Secteurs de marchés : Industrie, agroalimentaire, cosmétique, jouets, puériculture...

- Tests sensoriels réalisés avec un jury entraîné aux problématiques d'odeurs et de saveurs parasites.
- Expertise dans le secteur de l'emballage.
- Forte connaissances et expertise des métiers de la plasturgie : matières, procédés, design, réglementaire.

Purification et désodorisation des plastiques par extraction en extrusion sous CO<sub>2</sub> supercritique



Originalités :

- Procédé continu,
- Contrôle de la pression et du débit de CO<sub>2</sub>SC,
- Extraction des molécules jusqu'à 400 g/mol,
- Plus efficace que les procédés par désorption thermique ou entrainement à la vapeur.



Etudes de vieillissement dans l'eau de mer

Le Carnot MERS travaille sur le vieillissement de polymères et composites dans l'eau de mer depuis plus de 30 ans.

La cinétique et mécanismes de dégradation sous chargements couplés (diffusion d'eau + contraintes mécaniques) y est notamment étudiée.

Le Carnot MERS dispose de moyens d'essais permettant les études couplées, bien adaptées à l'étude de biopolymères. Il existe très peu de données sur la dégradation sous ces conditions mais la compréhension des mécanismes est essentielle pour la prédiction de la durée de vie et l'optimisation du dimensionnement.

Mieux concevoir, optimiser les quantités et les choix des matériaux. Applications en mer (offshore, pêche, portuaire...)



## Déformulation du plastique

**Identification des contaminants**      **Etudes de vieillissement**  
**Détection, élimination des odeurs**      **Retardateurs de flamme**

L'offre consiste dans des démarches de déformulation et identification de constituants notamment des charges fonctionnelles et des retardateurs de flamme.

L'état de dégradation des matières plastiques et leur capacité à émettre des COV, COSV et odeurs peuvent être caractérisés.

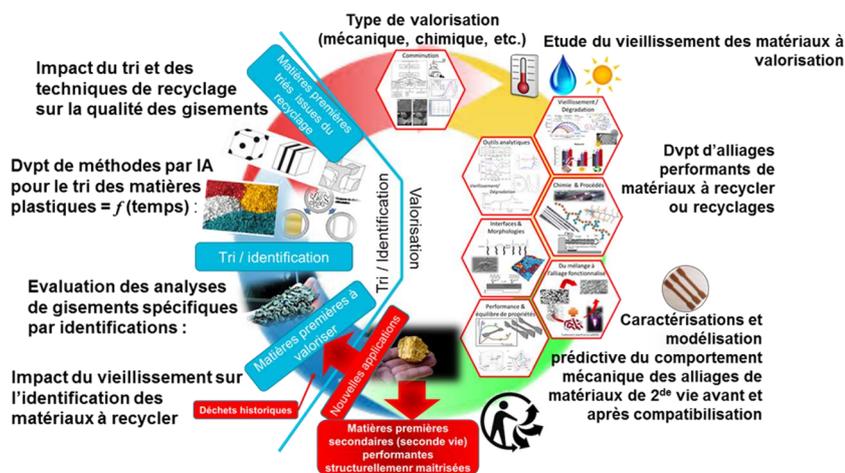
Des essais de vieillissement et de caractérisation des propriétés fonctionnelles après vieillissement peuvent être effectués. De nombreuses thèses et publications ont été réalisées dans tous ces domaines.

Le centre C2MA d'IMT Mines, Alès travaille depuis plus de 20 ans de manière continue sur des thématiques de recherche relatives au recyclage des matières plastiques (tri, identification des constituants, reformulation d'alliages de polymères).

Il développe également une activité de recherche de référence dans le domaine de l'ignifugation des plastiques et l'émission de COV et COSV.

Le centre CREER d'IMT Mines Alès travaille sur les problématiques d'odeurs et de désodorisation (activité de la plateforme Pacman).

Toutes applications, particulièrement celles impliquant des matières plastiques (ou composites) complexes et multicomposants.



Compétences en microstructure et analyse de composition des matières plastiques multicomposants, notamment pour applications dans le domaine de l'emballage, des équipements électriques et électroniques et du nautisme.

Capacité à identifier la présence de retardateurs de flamme. Expérience de collaboration industrielle sur tous ces thèmes pour différents types de plastiques et composites depuis les années 90.

## Vieillessement, dégradation, biodégradation notamment en milieu marin

- > Conseil dans le choix de matériaux plus respectueux de l'environnement et répondant aux exigences imposées par les usages (tenue mécanique sur une durée garantie par exemple)
- > Evaluation de la dégradation et la biodégradation des formulations plastiques dans différents milieux (compostage industriel ou domestique, sol réel, milieu marin...)
- > Analyses de l'éco-toxicité des éléments susceptibles d'être libérés lors de la dégradation des emballages en plastiques

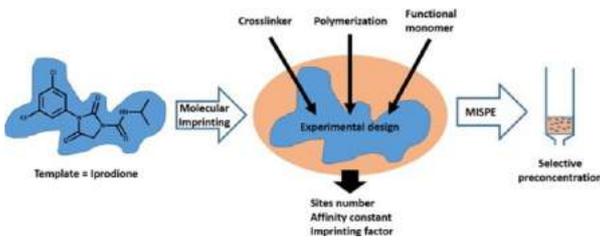
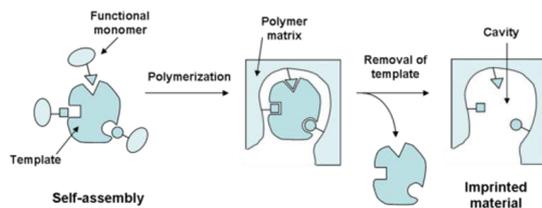


Applications :  
 L'industrie de l'emballage mais aussi les autres industries concevant et produisant des objets plastiques. Nous apportons nos savoir-faire aux secteurs du nautisme, des sports loisirs, des produits d'hygiène...

Institut Carnot Qualiment  
PAM

Développement de matériaux à empreinte moléculaire pour l'analyse sélective de composés à l'état de traces dans des matrices complexes

Qu'est-ce qu'un MIP ? - Polymère  
- Haute sélectivité  
- Haute spécificité



Exemple de la détection de fongicides dans le vin  
Applications possibles à différents composés à l'état de traces dans des matrices complexes

## **Le 100% biosourcé**

Mise au point et scale-up d'un procédé de purification de biomolécules en voie aqueuse par des technologies de séparation membranaire, et/ou des technologies de séparation chromatographique.

Ces compétences sont actuellement mises en œuvre dans le projet BioImpulse : développement d'un procédé de production et de purification d'une molécule biosourcée. Le projet vise à créer une nouvelle résine adhésive. Il est coordonné par Michelin (ResiCare), regroupe des acteurs publics et privés et est soutenu par l'ADEME.

Grâce à la mise en œuvre de microorganismes, d'enzymes et à notre expertise en bio-séparation, nous accompagnons les entreprises dans la rénovation et le développement de procédés et produits innovants.



Depuis 1989, le CRT CRITT Bio-Industries est un Centre de Transfert expert en Biotechnologies industrielles.



Mise au point et scale-up d'un procédé de purification de biopolymères par des technologies de cassage cellulaire, de séparation solide/liquide, et la caractérisation analytique associée.

Ces compétences sont actuellement mises en œuvre dans le projet Loop4pack : développement d'un procédé de production et purification d'un polymère de polyhydroxyalcanoate (PHA) biosourcé. Il vise à produire des emballages à partir de coproduits agroindustriels dans une logique d'économie circulaire.

Notre halle technologique permet de conduire des projets depuis la preuve de concept jusqu'au scale-up pré-industriel, en passant par la production de lots de démonstration.

Depuis 1989, le CRT CRITT Bio-Industries est un Centre de Transfert expert en Biotechnologies industrielles.

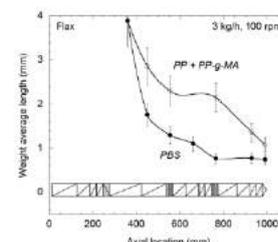


Des matrices biosourcées (PBS) peuvent être efficacement substituées aux matrices pétrosourcées (PP) notamment dans les applications automobiles (renforts intérieurs de porte, éléments de tableau de bord...).

En réalisant des compounds/composites en extrusion baxis, les équipes Fare ont dégagé des résultats marquants concernant les performances du PBS par rapport au PP : rôle de la polarité sur les phénomènes de casse de fibres lignocellulosiques (lin, chanvre) au cours du procédé, mécanismes de défibrage en tenant compte de la rhéologie de la matrice et de sa polarité.



L'intérêt d'utiliser une matrice biosourcée comme le PBS avec des fibres de lin ou de chanvre est d'avoir un compound entièrement « vert » et issu de la biomasse.



**Institut Carnot 3BCAR IATE**

**Emballages PHA 100% biodégradables en conditions de compost domestique et conditions naturelles**



Utilisation de polymère, polyhydroxyalacanoates, biosourcé et 100% biodégradable :

- Production du biopolymère à partir de sous-produits des industries agri-agro
- Premiers verrous techniques levés en terme de processabilité, performance technique en conditions d'usage évaluée,
- Biodégradable en conditions de home compost, conditions naturelles → solution au problème des particules de plastiques persistantes dans notre environnement

>> Prototypes de barquette (TRL6/7) obtenus à l'échelle industrielle par injection

Ces solutions ont été développées dans le cadre du projet européen Glopac.

Un premier retour d'expérience sur le transfert de technologies vers le monde industriel (industriels de l'emballage et de l'agro-alimentaire) est possible avec une vision de l'ensemble de la filière (de la production du polymère, en passant par les tests de durée de vie jusqu'à l'acceptabilité par le consommateur).



**Institut Carnot 3BCAR ITERG**

**Oligomères issus d'huiles végétales**



ITERG propose et développe à façon des oligomères biosourcés issus d'huiles végétales (estolides). Ces structures dénommées PRICs sont issues de ressources renouvelables (>95%) dont les fonctionnalités peuvent être adaptées en fonction des applications visées (fonctions acide, alcools, silanes, etc.).

Les estolides de la gamme PRIC répondent à un besoin des marchés en produits biosourcés. La biodégradabilité avérée ainsi que la non toxicité et écotoxicité en font des produits très prometteurs. De par leur structure polymérique, ils limitent enfin le surcoût lié à l'enregistrement de nouvelles molécules, auprès du référentiel REACH.

Les PRICs sont des oligomères mono ou difonctionnels qui peuvent être adaptés en terme longueur de chaîne, de degrés d'insaturation, de fonctionnalités. Leurs structures évolutives permettent de moduler les spécifications produits. Après une évaluation performancielle dans l'application ciblée, ITERG est en mesure d'accompagner sur sa plateforme de chimie du végétal, la production de ces molécules à l'échelle de quelques tonnes.

**Institut Carnot 3BCAR LCA / CATAR**

**Matériaux biosourcés pour l'emballage alimentaire**

LCA/Catar : une expérience reconnue dans le fractionnement et la transformation de la matière végétale notamment pour la fabrication d'agro-matériaux sous un angle holistique, en économie circulaire dans une approche pragmatique permettant de prendre en compte l'ensemble des questions liées à leur production et leur industrialisation.



Le Laboratoire de Chimie Agro-industrielle (LCA) et son centre de transfert technologique (Catar) proposent la fabrication d'agro-matériaux à partir d'agroressources.

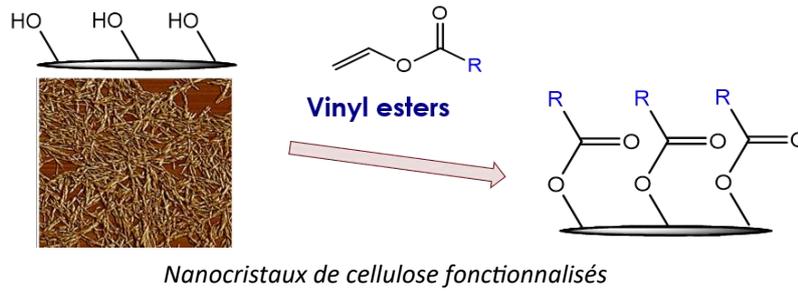


Ils peuvent être réalisés dès l'échelle pilote jusqu'à l'échelle pré-industrielle à partir d'un seul constituant ou d'un mélange de biopolymères (amidon, protéines, cellulose...), de fibres végétales (lin, miscanthus...) et/ou de bioplastiques (PLA, PHA...).

LCA/Catar : Halle Agromat à Tarbes



## Nanocristaux de cellulose : élaboration et fonctionnalisation



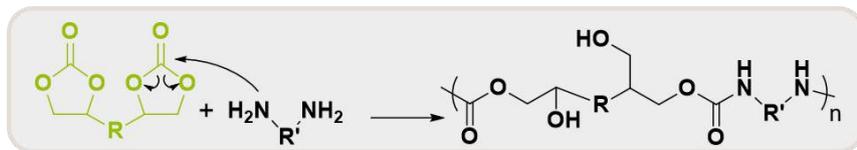
Applications :  
 Stabilisation d'émulsions  
 Matériaux composites

Avancée scientifique / technologique :  
 Réaction d'acylation par des méthodologies durables de nanocristaux de cellulose et utilisation de ces derniers pour l'élaboration de matériaux haute performance

## Polyuréthanes biosourcés et sans isocyanate

Elaboration de polyhydroxyuréthanes sans utiliser d'isocyanates

Applications : tous les secteurs d'application des PUs (mousses, adhésifs, élastomères, peintures, etc.).



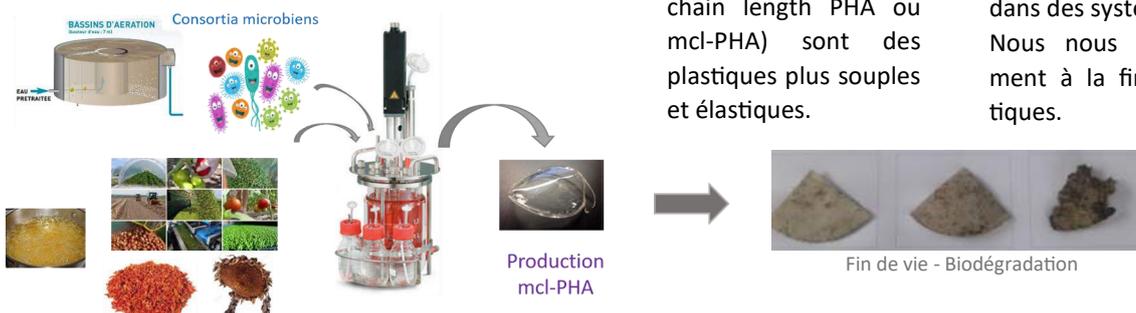
*La voie carbonate/amine : vers des PUs sans isocyanate*

Avancée scientifique / technologique :  
 Elaboration de synthons monomères carbonate et amine biosourcés.  
 Optimisation des conditions de synthèse entre carbonates et amines (procédés masse, émulsion, extrusion réactive)

## Production de mcl-PHAs à partir de résidus agricoles

Les polyhydroxy-alcanoates (PHA) sont des polyesters biosourcés et biodégradables. Les propriétés des PHA varient selon la longueur de la chaîne carbonée des monomères qui les composent : les PHAs constitués de monomères à 4 ou 5 carbones (short chain length PHA ou scl-PHA) tels que le PHB et le PHV, sont des plastiques friables. Les PHAs constitués de monomères à 6 -14 carbones (medium-chain length PHA ou mcl-PHA) sont des plastiques plus souples et élastiques.

Afin de réduire les coûts de production, nous étudions la production de mcl-PHAs à partir de résidus organiques et en utilisant des consortia microbiens dans des systèmes non-stériles. Nous nous intéressons également à la fin de vie des plastiques.



Le laboratoire Pimm a développé dans le cadre d'un programme Ademe une formulation à faible coût issue de coproduits de l'huilerie.

Cette formulation permet d'aboutir à une grande ductilité, sans perte de rigidité. Le PLA peut être mis en forme par extrusion soufflage de gaine ce qui permet de diminuer les coûts de fabrication des films.

Pimm a réalisé un dispositif spécial d'introduction de cette formulation ainsi qu'une méthodologie de mélangeage en extrusion double-vis.

De nombreux travaux ont été réalisés ainsi pour comprendre et optimiser la formulation, apte au contact alimentaire.



Usages : emballage alimentaire, applications qui requièrent des viscosités élongationnelles adaptées à des procédés d'extrusion soufflage de corps creux ( bouteilles, bonbonnes, réservoirs, etc..

Dans le domaine des matériaux biosourcés, nous travaillons notamment avec des phénols naturels qui permettent d'obtenir des propriétés thermomécaniques intéressantes. Nous élaborons également des mousses Dans le domaine des additifs biosourcés, nous nous intéressons spécifiquement aux additifs de rhéologie, aux retardateurs de flamme, aux plastifiants et aux additifs pour améliorer l'adhésion

Matériaux pour les applications d'emballages tels que : composites, adhésifs, revêtements, liants, mousses, encres...

**Water-borne biobased epoxy coating**

- ▶ BPA free
- ▶ Biobased
- ▶ Food contact approved



Dans le domaine du remplacement de substances dangereuses, nous élaborons notamment des époxy sans bisphénol A, nous remplaçons les phtalates, nous élaborons de polyuréthanes sans isocyanates...

Dans le domaine du recyclage, nous élaborons des polymères démontables et des vitrimères.



**Institut Carnot I2C**  
**PBS, LCMT**

**Biomacromolécules - Polysaccharides**

Le Carnot I2C travaille sur tous types de biomacromolécules comme les polysaccharides qui peuvent être d'origine végétale, animale, bactérienne ou fongique. Ce sont des ressources renouvelables, biocompatibles, biodégradables et qui possèdent une fonctionnalité chimique importante permettant une grande variabilité de structure de chaîne.

*Exsudats :*

gommes arabique, karaya, macracantha

*Algues :*

alginate, carraghénane...

*Bactéries :*

xanthane, scléroglycane

hyaluronane,

pullulane (« Polysaccharide modèle »)

*Plantes :*

lin (arabinoxylane)

fruits (pectines)

dérivés cellulosiques

(CMC, HEC, HMHEC, HPC, MC...)

*Animaux :*

chitosane



L'expertise des chimistes d'I2C est dans la fonctionnalisation de ces chaînes par des groupements chargés, des chaînons hydrophobes, des enzymes spécifiques, des peptides permettant d'accéder à de nouvelles propriétés.

**Institut Carnot I2C**  
**LCMT, COBRA**

**Valorisation des co-produits alimentaires**

- > Plastifiants (remplacement des phtalates)
- > Tensio-actifs et détergents anioniques, cationiques et non-ioniques
- > Résines phénoliques
- > Polyuréthanes (sans isocyanate)



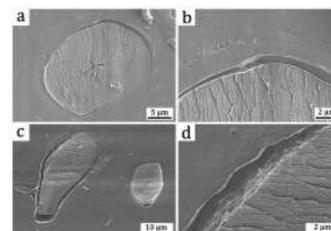
Le Carnot I2C valorise les co-produits alimentaires ou déchets pour des applications en cosmétique et en chimie des polymères. Nous extrayons, purifions, analysons les molécules d'intérêt. Nous fonctionnalisons ces molécules issues de bioressources pour obtenir des monomères biosourcés pour la polymérisation contrôlée cationique, anionique, photocatalysée, de nouveaux additifs, des plastifiants pour remplacer les phtalates, des tensio-actifs et détergents anioniques, cationiques et non ioniques, des résines phénoliques ou des polyuréthanes sans isocyanate.

**Institut Carnot I2C**  
**LCMT**

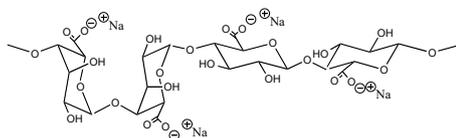
**Incorporation de fibres naturelles**



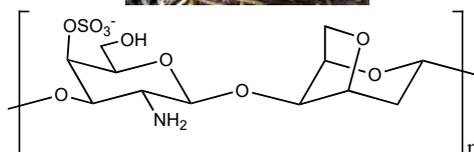
Le laboratoire LCMT travaille sur l'incorporation de fibres, comme le lin, dans vos matériaux afin d'améliorer leur adhésion et de renforcer leurs propriétés mécaniques. La formation de matériaux composites à base de fibre et du PLA, par exemple, permet une très bonne comptabilisation interfaciale et augmente la stabilité du support, diminue les phénomènes de vieillissement et donc augmente le panel des applications. Nous pouvons ainsi améliorer vos formulations, doper vos matières et les mettre en forme en maîtrisant les mécanismes reliant les structures et leurs propriétés.



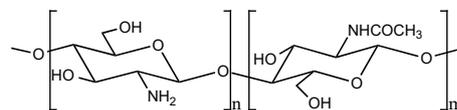
Nous utilisons tous types de polysaccharides dont ceux issus des algues comme les alginates, carraghénanes et chitosane en les fonctionnalisant pour atteindre le cahier des charges des entreprises via des processus verts.



ALGINATES



CARRAGHENANES



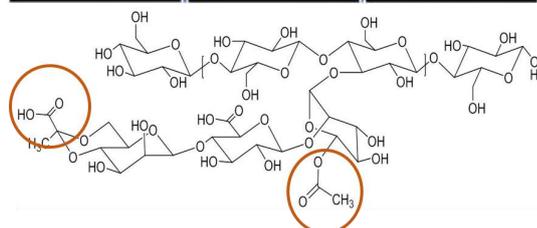
CHITOSANES



Ces polymères naturels sont biocompatibles et biodégradables. Leur structure chimique permet un large panel de modification faisant varier leurs propriétés. De plus, leur activités antibactériennes et antifongiques, leur propriétés complexantes dues à leurs multifonctionnalités en font des biomasses à forts potentiels. Enfin, les interactions avec les ions divalents (polyanion, polyacide) engendrent des gélifications thermotropiques et ionotropiques originales.

Ces nouvelles formulations peuvent prendre de nombreuses formes, emballage, membrane, films étirables, mais également billes, gels thermoréversibles, éponges, revêtements modulables en fonction des applications.

Les experts chimistes organiciens et polyméristes mettent leurs compétences à votre service pour améliorer la viscosité de vos mélanges et les propriétés de vos emballages et plastiques en réalisant des associations innovantes entre des polysaccharides, des peptides et/ou protéines.



Ces systèmes polymériques engendrent des entités macromoléculaires d'architectures variées et contrôlées via la compréhension des mécanismes d'interactions moléculaires. Nous développons également des techniques de réticulation chimique, physique et enzymatique plus vertes augmentant ainsi la stabilité de vos matériaux. Nous vous offrons la possibilité de tester vos plastiques d'un point de vue chimique, mécanique, thermique, rhéologique...

*Polysaccharides / oligosaccharides*  
*Mixte polysaccharide—protéine / peptide*

## Polymères issus d'algues, structurés par moussage

Ces polymères de faible densité présentent des propriétés de retard de flamme et d'isolation thermique. L'incorporation de fibres naturelles permet d'améliorer la performance mécanique de ces supports (fibres de lin, par exemple) ou leurs propriétés de surface (fibres de soie pour un toucher amélioré). Elaborés sans utilisation de composés toxiques, ni solvant, ces matériaux sont post-formables.

Afin de se rapprocher des exigences de production industrielle, les derniers développements se sont focalisés sur la fabrication de billes de mousses (à l'instar des billes de PSE).



Les volumes industriels de production de la matière première orientent vers des applications de niche mettant à profit les propriétés spécifiques de ces matériaux innovants : packaging antichoc, emballages techniques à propriétés améliorées (retard de flamme, isolation thermique, éléments coupe-feu, etc).

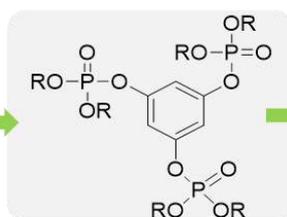
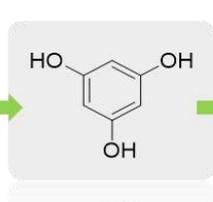
## Ignifugation, retardateurs de flamme

Le C2MA a développé une activité de recherche sur l'ignifugation des matières plastiques à partir des années 90, notamment le développement de composants biosourcés pouvant être utilisés dans des systèmes retardateurs de flamme en combinaison notamment avec des fibres naturelles. Réalisation de plusieurs travaux de thèse sur ce sujet (résines époxydes, tissus techniques...)

Laboratoire équipé pour réaliser des essais de réaction au feu.

Capacité à modifier chimiquement des fibres par greffage de composés phosphorés.

Applications : textile, transports, équipements électriques et électroniques, habitat...

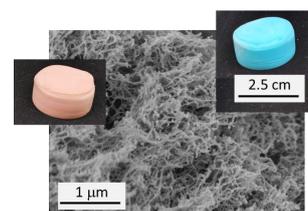


## Recyclage des textiles multi-composants

Le recyclage des textiles mixtes pose problème, comme le polycoton, composé de fibres naturelles (cellulose) et d'un polymère synthétique (polyester). En effet, la cellulose ne fond pas comme le polyester et les solvants classiques du polyester ne dissolvent pas la matière naturelle. Comment recycler les déchets textiles multi-composants en appliquant le principe d'upcycling ?

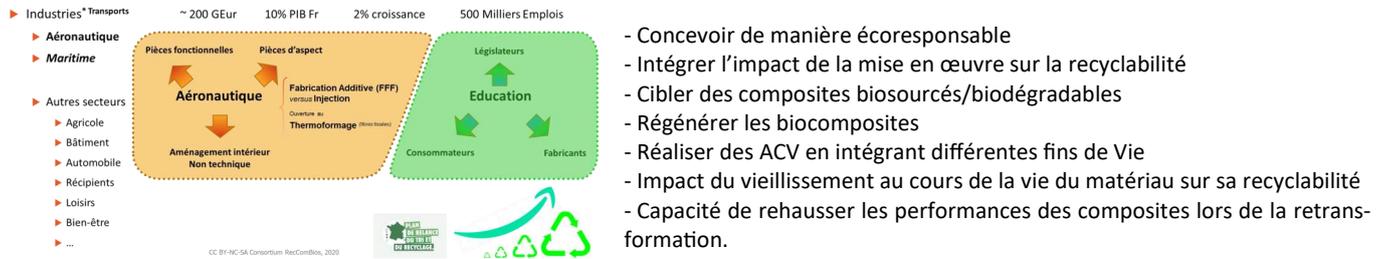
*Applications : packaging, matériaux pour la libération contrôlée (secteurs pharmacie, cosmétique, agroalimentaire).*

- > développer de nouveaux matériaux à base de déchets textiles multi-composants en utilisant de nouveaux solvants « intelligents », des liquides ioniques, afin de dissoudre sélectivement la cellulose.
- > explorer différentes voies de traitement de la cellulose, élaborer des aérogels\* à base de cellulose et réutiliser le polyester.



\*Les aérogels sont des matériaux à haute valeur ajoutée, caractérisés par une porosité très élevée (supérieure à 90%), une faible densité (autour de 0.1 g/cm<sup>3</sup>), et une nanostructure constituée de pores à très haute surface interne (plusieurs centaines de m<sup>2</sup>/g).

- > Développer des composites performants à base de biosourcés et alliages comportant divers types de fibres naturelles et/ou renforts et fillers produits sur le territoire national ou européen. Réalisation de traitements de surface des fibres en vue de maîtriser pleinement la cohésion interfaciale des composites et de maximiser leur résistance au vieillissement.
- > Relations chimies/ structures/ traitements/ procédés/ comportements/ ACV
- > Réalisation de processus de vieillissements destinés à simuler la vie utile des composites avant différents modes de retransformation : extrusion, injection, thermocompression et fabrication additive. Analyse de cycle de vie de l'ensemble

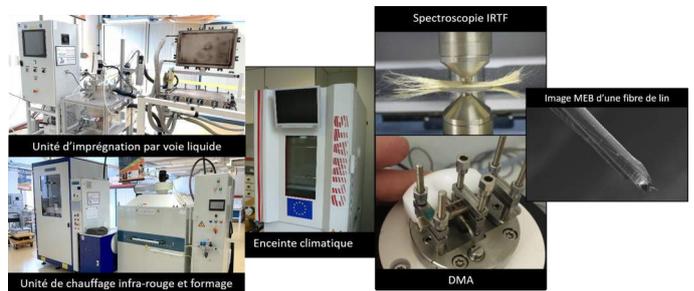


**Caractérisation de la dégradation des fibres végétales**  
**Aptitude des fibres à fabriquer des composites**

Comprendre les mécanismes de dégradation des fibres végétales dans des environnements hygro-thermiques variables est essentiel pour designer et fabriquer des matériaux durables dans le temps.

*Applications : sports et loisirs, automobile, emballages, construction...*

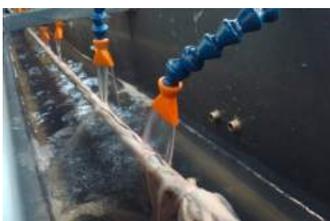
Les compétences en caractérisation et les moyens expérimentaux du GeM couvrent aussi bien les aspect physico-chimiques et mécaniques (mécanique des fluides, mécaniques du solide, comportements quasi-statique et dynamique, couplage hygro-mécanique). Elles permettent notamment de caractériser les aptitudes à fabriquer des composites avec ces fibres végétales par voie humide et voie sèche.



**Fibres biosourcées utilisables en environnement marin**  
**Amélioration des rendements de production des PHA**

L'institut Carnot MERS travaille sur les fibres polymères et naturelles pour renfort de polymères et comme éléments de cordages et filets. On constate un intérêt grandissant pour les fibres biosourcées (PLA, PBS mais également lin, chanvre). Cependant la durée de vie de ces matériaux en milieu marin est peu connue. Nous sommes en contact, par exemple, avec des fournisseurs de produits à base de fibres (corderies, fabricants de filets) qui cherchent des alternatives plus respectueuses de l'environnement (recyclage, réutilisation, biodégradabilité...).

Nos domaines d'excellence : mécanismes de dégradation et modèles de durabilité fiables et validés.



Nous travaillons aussi sur les PHA, des polyesters naturels, biosourcés, biodégradables et biocompatibles produits par certaines bactéries et dont la biosynthèse peut être obtenue au laboratoire par l'application d'un stress énergétique. Les travaux menés au LM2E s'intéressent à l'élaboration de stratégies de bioconversion afin d'améliorer les rendements de production de PHA et d'orienter le métabolisme vers la biosynthèse de PHA de structure contrôlée, couvrant une large diversité structurale, incluant des monomères saturés, insaturés, et/ou portant des groupements fonctionnalisés originaux. Nous disposons d'une souche riche et d'un savoir-faire important sur la manipulation des PHA.

## Modification des propriétés des polymères par l'irradiation

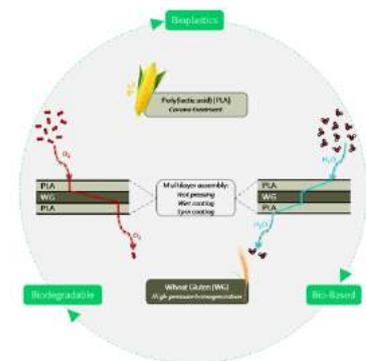
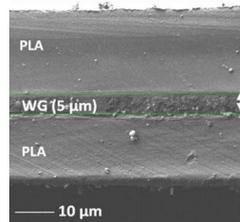
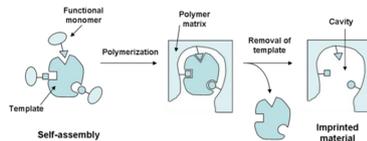
L'irradiation par rayonnement ionisant permet la modification des propriétés intrinsèques de la matière. Dans le domaine des polymères, deux grands mécanismes dominent ces modifications, la réticulation de chaînes moléculaires et la dégradation. Correctement contrôlée, l'irradiation peut favoriser l'un ou l'autre de ces mécanismes et permet le renforcement ou la dégradation des propriétés globales des matrices (thermomécaniques, viscosité, propriétés barrière, etc...).



Aerial-crt est un centre d'expertise pour les applications industrielles de l'irradiation. Ses équipements sont à la pointe de la technologie actuelle en termes d'irradiation ou de dosimétrie associée au procédé. Ses équipes sont constituées d'expert pouvant répondre à une large gamme de domaines au travers de formation, d'études ou de prestation.

Les potentialités de l'irradiation sont nombreuses et peuvent se caractériser comme un co-traitement lors de sourcing de monomères à un traitement terminal sur un produit fini en vue de modifier ses propriétés globales. Ainsi une large gamme de métiers peuvent être concernés par ses applications.

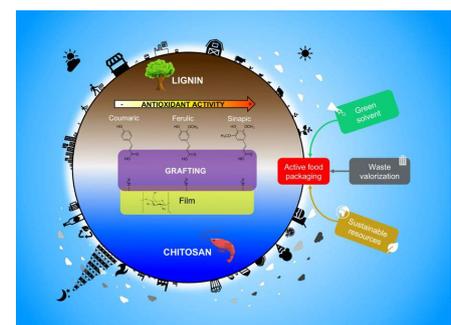
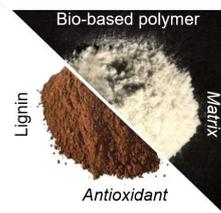
## Multicouches PLA-gluten-PLA



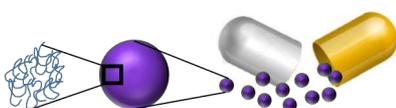
Réalisation de multicouches PLA-gluten-PLA pour améliorer les multipropriétés barrière tout en conservant la biodégradabilité

## Valorisation de la lignine et du chitosan

Valorisation de la lignine et du chitosan comme emballage actif antioxydant

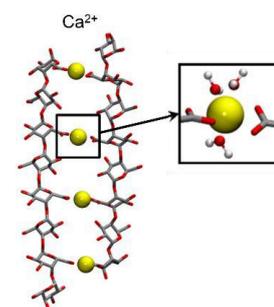


## Valorisation de la pectine



Utilisation pour la libération ciblée (colonique) de composés actifs (médicaments, probiotiques)

Valorisation de la pectine comme enrobage comestible pour des applications en pharmacie galénique



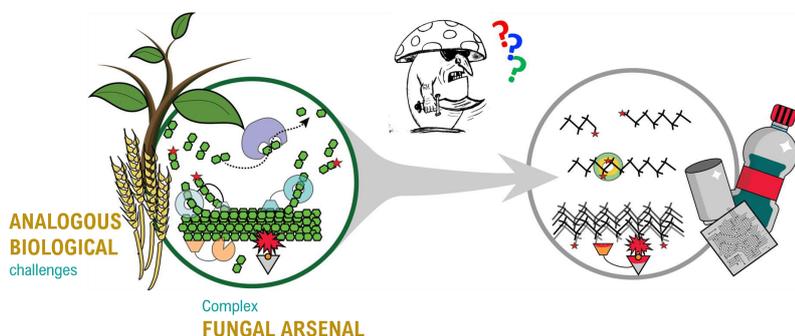
Application pour l'enrichissement en Fe<sup>2+</sup> et la stabilité du composé délivré



© Richard Villalon

# Optimisation des procédés

La recherche, encore à un stade précoce, explore le potentiel de la biodiversité des champignons fongiques à dégrader divers plastiques. Elle vise à développer une ingénierie de ces enzymes fongiques afin de créer des super-dégradateurs.



*Casser ces liaisons C-C par voie biologique est un réel défi.*

- > vise des polymères C-C pour lesquels il n'y a pas de solution de bioconversion.
- > s'appuie sur une collection unique de champignons filamenteux et sur l'expertise associée.
- > utilise l'expertise du laboratoire sur les métallo-enzymes pour permettre l'oxydation, et donc la dégradation/ fonctionnalisation des polymères C-C.

L'intensification permet d'accéder à des procédés :

*Plus efficaces* : amélioration des rendements et de la sélectivité, optimisation du post-traitement.

*Plus sûrs* : réduction des en-cours, amélioration du contrôle du procédé (performances accrues des équipements, suivi en ligne).

*Plus économes* : optimisation des matières premières, concentration des milieux (réduction des solvants), efficacité énergétique (réduction de la consommation).

Le CRITT Génie des Procédés, avec l'appui du Laboratoire de Génie Chimique, réalise pour le compte de ses clients, de nombreuses démonstrations d'Intensification des Procédés, à l'échelle pilote ou préindustrielle : transposition du batch en continu ou optimisation de procédés. Ces compétences s'articulent autour d'une plateforme dédiée à la réaction et au downstream processing, qui rassemble un plateau unique de technologies intensifiées.



*Cristallisation en continu d'un actif pharmaceutique*

Nitrations, oxydations, polymérisations, cristallisations, fluorations, hydrogénations, substitutions et additions électrophiles/nucléophiles, réactions organométalliques, réactions enzymatiques, synthèse de liquides ioniques.

IATE s'intéresse à la montée en échelle d'outils logiciels d'aide à la décision. Ces outils permettent de dimensionner au mieux un emballage alimentaire en fonction des besoins du produit dans une optique de réduction des pertes alimentaires (optimisation des propriétés barrière, de l'atmosphère modifiée, de la conservation du produit, etc). tout en tenant compte d'autres critères liés à la processabilité, l'origine des ressources, la fin de vie des matériaux en calculant notamment des scores de durabilités (ou éco-score).

Solution logicielle alternative à l'option expérimentale de type essai / erreur, gain de temps, gain économique, exploration de solutions possibles via la base de connaissances associée.

Niveau de TRL actuel: 6/7 : logiciels accessibles via une plateforme en ligne avec interface utilisateur conviviale.

	%O2 at Shelf Life	%CO2 at Shelf Life	Transparency	Biodegradable	Recyclable
hg 55		8	Opaque	Yes	Yes
5ing 55		4	Opaque	No	Yes
55		5	Transparent	Yes	Yes
55		8	Semi-transparent	No	Yes
55		5	Opaque	Yes	Yes
55		8	Transparent	Yes	Yes
55		5	Opaque	Yes	Yes
55		8	Opaque	Yes	No
55		8	Transparent	No	No
55		2	Opaque	No	No
55		8	Transparent	No	No

L'Éco-conception suivant la méthodologie d'Analyse du Cycle de Vie (ACV, normée ISO) permet d'obtenir un diagnostic multicritère des performances environnementales d'un produit, d'un procédé, d'un service ou d'une organisation sur l'ensemble de sa chaîne de valeur. La quantification des impacts environnementaux est réalisée sur des indicateurs biophysiques comme le changement climatique, l'acidification des écosystèmes ou la réduction de la couche d'ozone. L'écoconception va permettre de cibler de manière robuste les meilleurs leviers d'optimisation à actionner.

L'expertise du pôle, centrée sur les agro-bio procédés, vous permettra d'obtenir une analyse exigeante et innovante de vos performances sur des indicateurs biophysiques en se fondant sur les sciences de l'environnement et l'expertise d'INRAE.

Les résultats obtenus, avec une quantification des impacts environnementaux, vous permettront de fiabiliser vos choix de conception ou de nouveaux matériaux, et de rendre vos engagements encore plus concrets et crédibles.



**Cibler les étapes clés**



**Analyser des leviers de réduction**



**Comparer des alternatives**

**L'extrusion bi-vis, technologie compacte et polyvalente pour le développement de procédés de bioraffinerie**

Le LCA est doté d'un parc machine sans équivalent en France avec quatre extrudeurs bi-vis de marque Clextral (France), pour des capacités de traitement allant de 1 kg/h à 200 kg/h environ. Au travers des recherches menées par les équipes du LCA, l'extrusion bi-vis apparaît aujourd'hui comme une technologie extrêmement polyvalente qui permet de combiner plusieurs opérations unitaires (convoyage, broyage, mélange, cisaillement mécanique intense, plastification, déshydratation, évaporation, compression, extraction, formage) de manière continue et très compacte.



De très nombreux produits et sous-produits agricoles ont ainsi été traités au LCA par extrusion bi-vis afin d'être déstructurés pour devenir thermoplastiques, pour améliorer leurs propriétés, pour extraire sélectivement certains composants, pour les mélanger avec d'autres liants, pour les préparer à des biotransformations (production de bioéthanol ou de biométhane par exemple), etc.

La technologie d'extrusion bi-vis est donc particulièrement adaptée au traitement des biomasses, et ce pour une multitude d'applications.

**Procédé de traitement du polyvinilbutyral (PVB)**

Procédé de traitement du PVB, film polymère inséré dans le verre feuilleté (vitrage, pare-brise), afin de désincruster les fins éclats de verre dans les chips obtenues après concassage et broyage.

Procédé, en milieux aqueux avec des additifs éco-compatibles et sous ultra-sons (puissance et fréquence adaptées) à température contrôlée, permettant de désincruster entre 99,5 et 99,9 % en masse du verre.



Recycler un plastique (10-15 euros/kg lors de la synthèse) de haute technicité (transparent, adhésif au verre, élastique, stable en température), tout en réduisant la libération de CO<sub>2</sub> (1 tonne PVB recyclé = 2 tonnes CO<sub>2</sub> gaz non dégagé) et avec la possibilité de réutiliser le bain de traitement à plusieurs reprises.



*10 litres solution aqueuse sel basique + tensioactif + 1kg chips PVB souillé dans cuve ultra-sons à température, fréquence et puissance contrôlées*

Nous travaillons sur la possibilité de produire des PHA à partir de déchets organiques diversifiés. Pour cela, un procédé bioélectrochimique innovant (<https://biorare.inrae.fr/>) est utilisé pour produire des acides carboxyliques qui permettent ensuite de produire sélectivement des PHA de spécialité à partir de levures génétiquement modifiées.

Utilisation d'une matière première à « coût négatif » (déchets et eaux usées), couplage de traitement de déchet et de production de bioplastique.

Technologie de production sélective d'acide acétique à partir de déchets organiques à l'aide d'un procédé bioélectrochimique à TRL5 (avec propriété intellectuelle associée).

Collaboration avec des spécialistes de la modification génétique des levures à INRAE-Micalis pour le design de levures produisant sélectivement des PHA de spécialité.

Nous réalisons la sélection, sur des bases fonctionnelles, de populations microbiennes en culture continue sur des effluents et résidus agroindustriels. Ces consortia microbiens sélectionnés présentent une capacité de surproduction de polymères de types polyhydroxalcanoates ou de types polysaccharidiques qui peuvent être utilisés dans des formulations de bioplastiques.

Les points originaux sont: une production de biopolymères sur résidus et co-produits à partir de microorganismes naturels sans stérilisation ni micro-organismes génétiquement modifiés. Nos compétences concernent les procédés de sélection microbienne, de production et d'extraction des polymères.



L'avantage est d'utiliser des consortia naturels dans des conditions opératoires qui visent une moindre consommation d'énergie et permet la valorisation de résidus. Nous visons :

- des polyhydroxalcanoates de type P(HB-co-HV) avec une teneur en HV de 20% permettant d'obtenir un polymère compatible avec la formulation de thermoplastiques.
- des polysaccharides qui ont des propriétés de retardeurs de flamme .

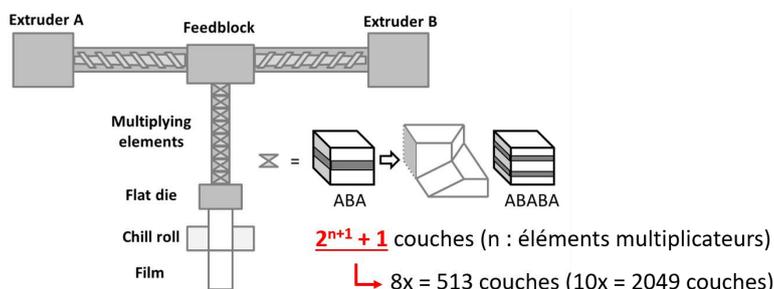
Le laboratoire PIMM a mis en place un procédé de revêtement de films plastiques permettant la diminution de leur perméabilité par le biais de l'enduction de polymères pétro ou bio-sourcés nanochargés.

Cette technologie permet de fabriquer des films parfaitement recyclables compte tenu de la faible épaisseur de l'enduit déposé avec des propriétés barrière pouvant égaler celles des films PE-EVOH-PE. La technologie est basée sur le dépôt en continu d'une solution via une buse d'enduction qui est suivie d'une étape de séchage.

PIMM a développé une expertise en travaillant sur les paramètres procédés et matière en vue de réaliser des enduits de quelques micromètres d'épaisseur. L'adhésion de l'enduction, sa rhéologie, son optimisation en vue de ses propriétés barrière sont des paramètres pour lesquels PIMM dispose d'une expertise. La dispersion des nanocharges fait également partie de l'expertise du PIMM en termes de caractérisation et d'optimisation.

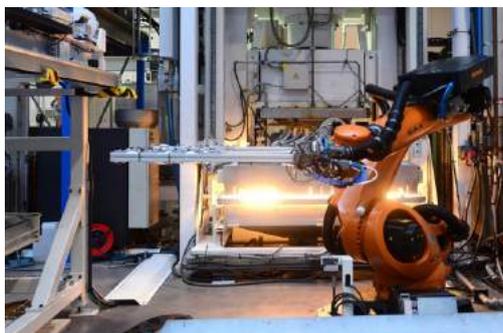


PIMM a développé une expertise de ce procédé en travaillant sur les paramètres procédés et matière en vue de réaliser des structures multimicro-nanocouches continues et a donc aujourd'hui un procédé optimisé. Le PIMM a également mis en place les méthodes d'analyse des structures principalement par AFM et a développé des méthodologies pour les mesures des propriétés finales et des structurations en vue de relier les paramètres procédé à la structure obtenue et finalement aux propriétés finales. Des nouveaux développements en cours pour l'amélioration des propriétés barrière aux gaz portent sur la combinaison de ce procédé avec le procédé de biétrage.



L'utilisation plus large de ce procédé doit permettre de limiter la quantité de polymères à bonnes propriétés barrière qui sont chers et qui rendent les structures difficilement recyclables notamment pour l'emballage alimentaire. Elle doit permettre aussi de limiter les épaisseurs finales des emballages à iso-propriétés à condition d'utiliser la multiplication des couches pour garantir des propriétés mécaniques suffisantes.

Le Cetim a développé un procédé d'estampage surmoulage permettant d'optimiser la quantité de matière nécessaire pour répondre à des spécifications mécaniques et de masse d'une pièce. Également, par l'utilisation de ce procédé, il est possible de réduire de façon significative les chutes de matières (-30% sur cadre de hublot).



Aspects différenciants :

- Mise en place d'un procédé et d'un logiciel d'optimisation matière, découpe.
- Temps cycles compatibles automobile
- Réduction du coût Matière Première et du taux de chutes .

Marchés : auto, aéro, sports & loisirs

Au travers des études de cas réalisées sur les procédés mécaniciens, le Cetim a développé cette expertise sur les technologies supports des procédés de la plasturgie (optimisation des rendements, transmissions hydrauliques et pneumatiques) et des utilités (réseau air comprimé, chauffage, ventilation, froid industriel...).

En complément, les dispositifs PROREFEI et Bilan CO<sub>2</sub>/Bilan GES sont également dans notre cœur de métier.

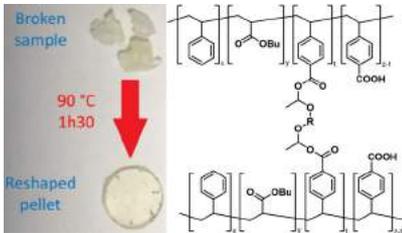


Faire appel au Cetim, c'est garantir des résultats pouvant aller jusqu'à 30% de réduction de consommation énergétique, dans une logique d'optimisation organisationnelle et Process. C'est le résultat de la synergie entre une expertise énergétique et une expertise métiers.



## Réseaux covalents adaptables (CAN) et vitrimères

Dans le cadre du développement des offres de notre Carnot dans le domaine de la réduction des impacts, nous effectuons des recherches dans le domaine en plein essor des réseaux covalents adaptables (CAN) et des vitrimères. Ces matériaux innovants à l'intersection des polymères thermodurs et des thermoplastiques, possèdent des propriétés proches de celles des polymères réticulés et la capacité de remise en forme (et donc de recyclage) des polymères non réticulés.

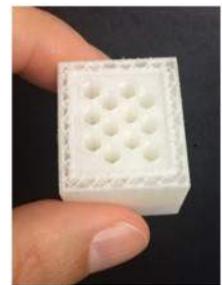
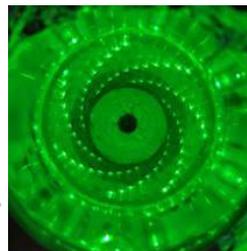
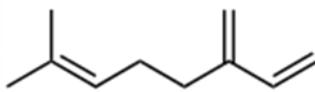


Nos recherches dans le domaine des CAN et des vitrimères visent à développer de nouvelles chimie vitrimères ainsi qu' à améliorer les chimie existantes. Par exemples, nous développons des vitrimères de transestérification sans catalyseurs et avons développer la première chimie vitrimères basée sur l'échange d'acide carboxylique. Nous déployons aussi ces concepts sur les matériaux qui nous distinguent au niveaux national et international, à savoir, les matériaux fluorés, phosphorés et biosourcés.

Les vitrimères permettent la remise en forme des matériaux et donc un recyclage ou un démontage de pièces aisé. Les applications sont extrêmement diverses et rassemblent tous les domaines d'application des matériau thermodurs.

## Polymérisation de monomères biosourcés en flux

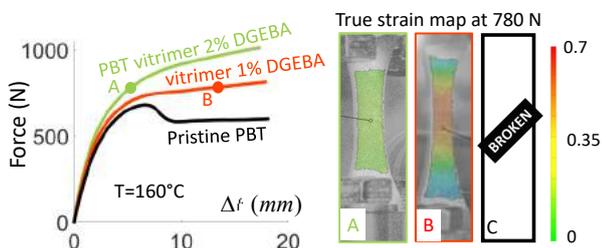
Les réacteurs miniaturisés en flux continu sont une alternative aux macroréacteurs en batch actuellement majoritairement utilisés en industrie. Cette technologie permet un gain de temps, d'énergie, une économie de réactifs, une optimisation facile et une production élevée. Elle est déployée en milieu industriel.



Le Carnot I2C possède les équipements et les compétences pour transposer vos synthèses à cette technologie de pointe. Ainsi, la polymérisation de monomères biosourcés tels que le myrcène a permis d'obtenir un polymyrcène, substitut du polybutadiène, de manière contrôlée avec succès.

## Les vitrimères : des thermodurs recyclables

Depuis 2019, nous travaillons sur les vitrimères, nouveaux matériaux offrant la possibilité de « convertir » un ThermoPlastique précurseur en un vitrimère, i.e. « équipant » sa microstructure d'un supra-réseau de liaisons de type réticulation mobiles. La mobilité des liaisons est thermiquement activée. Un vitrimère « idéal » présente donc les caractéristiques suivantes : à l'état solide, aux températures de service, les liaisons de réticulation sont figées et le matériau a potentiellement les mêmes caractéristiques qu'un thermodur. A l'état fondu les liaisons de réticulation deviennent mobiles du fait de l'activation thermique, le matériau peut à nouveau s'écouler et reste potentiellement recyclable.

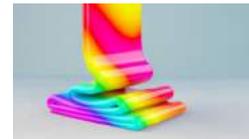


Substitution de matériaux 'équivalents' aux ThermoDurs, offrant une possibilité de recyclage commune aux TP voire l'améliorant.

Nouvelle gamme de matériaux composites pour des pièces de structure allégées (aéronautique, transport, applications électriques)

## Intégration de matières recyclées dans un produit plastique

- Etude de faisabilité d'intégration de matières plastiques recyclées dans un produit plastique.
- Identification et validation de sourcing matière
- Réalisation de formulation en fonction du cahier des charges
- Réalisation d'essais pour valider les performances sur éprouvettes
- Optimisation du seuil d'intégration de matières plastiques recyclées dans un produit plastique
- Validation de l'adéquation de la solution retenue avec le cahier des charges et les aspects réglementaires
- Intégration des matières plastiques recyclées par la technologie de mixte matière vierge/recyclé ou par procédé sandwich
- Ligne pilote de recyclage entièrement modulable pour produit souple ou rigide.
- Ligne de compoundage pour la formulation des matières
- Analyses laboratoires pour mesurer le niveau de qualité des matières plastiques recyclées (mécanique, physico-chimique, compatibilité réglementaire...).
- Moyens de transformation industriels (extrusion, extrusion multicouche, injection, injection sandwich, thermoformage, film...)
- Outils pour réaliser des éprouvettes d'essais.
- Réalisation d'essais sur outillage client.
- Fortes Connaissances et Expertise des métiers de la plasturgie : matières, procédés, design, réglementaire.
- Animation de Groupes de Travail de Normalisation sur les matières plastiques recyclés.



## Institut Carnot M.I.N.E.S CEMEF

## Recyclabilité des polyesters et polyoléfines et aptitude au formage



Les actions de recherche du CEMEF sur les polymères sont centrées sur la compréhension des effets du recyclage de polyesters (comme par exemple le PET) ou de polyoléfines (comme par exemple le polypropylène) sur l'aptitude au formage et le développement de microstructures induites. Les procédés de mise en forme comme le soufflage de corps creux, le thermoformage ou l'étirage de films en sont les applications principales étudiées.

## Institut Carnot M.I.N.E.S CEMEF

## Développer des composites 'sur-mesure'

- Développer des composites 'sur-mesure' à base de multi-matériaux pétro-bio sourcés/dégradables, organique, minérale & hybride, chargée ou non (renforts multi-échelle).
- Relations chimiques/ structures/ traitements/ procédés/ comportements/ ACV
- Développement d'innovation dans l'Industrie 4.0 en Fabrication Additive
- Expérience & Modélisation à compréhension thermodynamique, physique, chimique, mécanique, fonctionnalité



- Besoin 'à la demande'
- Conceptualisation d'idées et procédés 'avancés prototypes'
- Multi-matériaux (pétro-bio sourcés/dégradables, organique, minérale & hybride)
- Conception écoresponsable
- Maîtrise pour aller sur des matériaux innovants
- Maîtrise pour aller sur de la structuration spécifique
- Maîtrise pour aller sur de la recyclabilité spécifique
- Maîtrise pour aller sur de la fonctionnalité spécifique
- Maîtrise pour aller sur de la régénération spécifique
- Transitions fluides/solides (gélification, solidification, etc.)
- Traitements chimiques, mécaniques, physiques

## Institut Carnot PolyNat

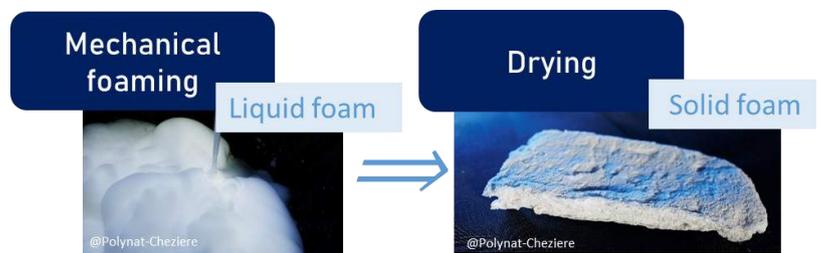
### LRP

A travers trois projets, nos équipes cherchent à développer des mousses bio-sourcées avec des caractéristiques similaires aux mousses pétro-sourcées traditionnellement utilisées dans les emballages pour résister aux chocs, à la compression ou pouvant servir d'isolant thermique (polystyrène expansé, mousses de polyuréthanes).

Elles ont travaillé sur la génération de mousses en formulant des suspensions à base de cellulose, puis en identifiant la technique de foisonnement la plus adaptée.

Les projets ont permis la conception et la maîtrise de bancs pilotes générateurs de mousse permettant de produire en continu (gros volume) des mousses stables à taux d'aération contrôlé, et reproductible.

A ce jour, les équipes étudient les technologies de séchage appropriées afin d'obtenir un procédé de production global de mousses bio-sourcées reproductible, transposable à l'échelle industrielle et compétitif vis-à-vis des procédés actuels.



## **Autres offres R&D**



Les chercheurs du CEREGE s'intéressent depuis plusieurs années à la thématique des particules microplastiques par le biais de diverses approches basées sur :

- le développement et la validation de protocoles d'extraction rapides, simplifiés, fiables des micro et des nano-fragments dans des échantillons d'eau et de sédiments,
- l'identification des microplastiques par imagerie haut débit (réalisation d'un catalogue des microplastiques dans la baie de Marseille),
- la quantification des microplastiques dans les eaux de surface et dans la colonne d'eau (sur la base de profils verticaux),
- le suivi spatio-temporel,
- l'étude du transfert horizontal et vertical des particules (de la surface au sédiments) (collaboration MIO).

Les objectifs à court terme sont de produire des méthodes de caractérisation des nano-plastiques pour les partenaires socio-économiques et de proposer des outils d'aide à la décision pour les actions de réduction et de traitement des pollutions plastiques.

En partenariat avec collectivités, associations professionnelles et entreprises DEEP s'est investi dans divers travaux tels que :

- la séparation des emballages du flux de biodéchets et la quantification et caractérisation des macro-plastiques.
- le développement analytique, la modélisation et la mesure du transport des déchets plastiques à l'aide de méthodes de reconnaissance « machine learning ».

- Hydrologie urbaine sur production et transfert des flux de polluants à l'échelle d'un bassin versant urbain .
- Mécanique des fluides sur l'identification des mécanismes de transport, de rétention et de relargage des polluants particulaires au sein des hydro-systèmes urbains .
- Méthodes de caractérisation physico-chimique des polluants particuliers, notamment mesure des vitesses de chute



Engagé notamment dans des travaux de recherche avec l'Agence de l'Eau Rhône Méditerranée Corse, DEEP a réalisé un état de l'art des connaissances scientifiques sur la dissémination des micro et nano plastiques dans les hydrosystèmes urbains.



DEEP met en œuvre des essais exploratoires d'échantillonnage en station d'épuration, des tests de techniques analytiques d'identification et de quantification, ainsi que des travaux exploratoires sur le transport des microparticules au sein des écoulements à surface libre (expérimentation laboratoire et modélisation analytique et numérique).

- Détermination de l'hydrolyse enzymatique des polymères,
- Essais de biodégradation : essais labo (anaérobie, aérobie ; conditions de compostage, de méthanisation...; milieu aqueux, milieu solides; mésophile, thermophile),
- Bonnes connaissances et équipements pour tests standardisés.

Institut Carnot ESP  
IRSEEM

## Reconnaissance de bouteilles plastiques par analyse d'images

L'ESIGELEC et la société GREENBIG collaborent sur la reconnaissance de bouteilles plastiques par analyse d'images pour le recyclage au plus près du consommateur. Un automate B:bot collecteur de bouteilles en plastique PET installé dans les supermarchés trie les bouteilles par couleur et les broie en paillettes plastiques. Le but étant de séparer les gisements et de réduire leurs encombrements afin de limiter l'impact carbone lié au transport.

L'ESIGELEC utilise son expérience en intelligence artificielle et en systèmes embarqués pour améliorer l'efficacité du système de tri. La fonctionnalité développée doit être en mesure de fonctionner avec des ressources CPU limitées et des capteurs faible coût.



L'avantage du système proposé permet d'améliorer la qualité du gisement plastique en séparant de manière optimale les plastiques transparents des plastiques colorés, ce qui permet une meilleure valorisation des matières plastiques tout en limitant le coût de transport de celles-ci. L'application de technologies d'intelligence artificielle sur le tri plastique, peut être étendue aux tris d'autres matières.

# Le réseau Carnot

UN FORT ANCRAGE  
TERRITORIAL  
FACILITANT L'ACCÈS  
AUX ENTREPRISES

# 39

instituts Carnot  
implantés  
dans chaque  
région française



Retrouvez  
les 39 Carnot  
sur notre site  
internet :  
[www.instituts-carnot.eu/fr/39-carnot](http://www.instituts-carnot.eu/fr/39-carnot)

## Auvergne-Rhône-Alpes

- 3BCAR
- ARTS
- CALYM
- CEA LETI
- Cetim
- Clim'Adapt
- Cognition
- Eau et Environnement

- Énergies du futur
- France Futur Élevage
- IFPEN Ressources Énergétiques
- IFPEN Transports Énergie
- Ingénierie@Lyon
- Inria
- LSI

- M.I.N.E.S
- MECD
- MICA
- OPALE
- Plant2Pro
- PolyNat
- Qualiment
- Télécom & Société numérique

## Bourgogne-Franche-Comté

- ARTS
- Clim'Adapt
- Cognition
- OPALE
- Plant2Pro
- Qualiment
- Télécom & Société numérique

## Bretagne

- AgriFood Transition
- ARTS
- CALYM
- Clim'Adapt
- France Futur Élevage
- Inria
- MERS
- MICA
- Plant2Pro
- Qualiment
- Télécom & Société numérique

## Centre-Val de Loire

- Cetim
- Clim'Adapt
- France Futur Élevage
- MECD
- OPALE

## Grand Est

- 3BCAR
- ARTS
- Clim'Adapt
- ICÉEL
- Inria

- MICA
- Télécom & Société numérique

## Hauts-de-France

- ARTS
- Cetim
- Clim'Adapt
- Cognition
- Inria
- MERS
- M.I.N.E.S
- MICA
- OPALE
- Plant2Pro
- Qualiment

## Île-de-France

- 3BCAR
- AP-HP
- ARTS
- CALYM
- CEA LIST
- Cetim
- Clim'Adapt
- Cognition
- Curie Cancer
- Eau et Environnement
- France Futur Élevage
- ICÉEL
- ICM
- IFPEN Ressources Énergétiques
- IFPEN Transports Énergie
- Imagine
- Inria
- IPGG Microfluidique

- M.I.N.E.S
- MECD
- OPALE
- Pasteur MS
- Plant2Pro
- PolyNat
- Qualiment
- Télécom & Société numérique
- Voir et Entendre

## Normandie

- AgriFood Transition
- CALYM
- Clim'Adapt
- ESP
- I2C

## Nouvelle-Aquitaine

- AgriFood Transition
- 3BCAR
- ARTS
- CALYM
- Clim'Adapt
- Cognition
- Eau et Environnement
- France Futur Élevage
- Inria
- ISIFoR
- MECD
- MICA
- OPALE
- Plant2Pro
- PolyNat

## Occitanie

- 3BCAR
- CALYM
- Chimie Balard Cirimat

- Clim'Adapt
- Cognition
- France Futur Élevage
- Inria
- ISIFoR
- M.I.N.E.S
- MECD
- MERS
- OPALE
- Plant2Pro
- Qualiment

## Pays de la Loire

- AgriFood Transition
- ARTS
- CALYM
- Cetim
- Clim'Adapt
- France Futur Élevage
- Inria
- MERS
- M.I.N.E.S
- Qualiment

## Région Sud

- 3BCAR
- ARTS
- CALYM
- Clim'Adapt
- Cognition
- Eau et Environnement
- Inria
- M.I.N.E.S
- OPALE
- Plant2Pro
- Qualiment
- STAR
- Télécom & Société numérique

# Les instituts Carnot participants

Institut Carnot 3BCAR

[Le site](#)

Institut Carnot ARTS

[Le site](#)

Institut Carnot Cetim

[Le site](#)

Institut Carnot Chimie Balard Cirimat

[Le site](#)

Institut Carnot Eau & Environnement

[Le site](#)

Institut Carnot ESP

[Le site](#)

Institut Carnot I2C

[Le site](#)

Institut Carnot ICÉEL

[Le site](#)

Institut Carnot Ingénierie@Lyon

[Le site](#)

Institut Carnot M.I.N.E.S

[Le site](#)

Institut Carnot MERS

[Le site](#)

Institut Carnot MICA

[Le site](#)

Instituts Carnot PolyNat

[Le site](#)

Institut Carnot Qualiment

[Le site](#)

# Un réseau au service des entreprises

10 200  
contrats de recherche  
par an

dont 4 900  
avec des PME-ETI

Un réseau  
national  
à fort ancrage  
territorial

20%  
des effectifs  
de la recherche  
publique

39  
Carnot

Un Réseau  
de R&D  
pluridisciplinaire

Une relation  
partenariale  
professionnelle

55%  
de la R&D financée  
par les entreprises  
à la recherche  
publique française

**Vous avez un projet  
d'innovation, un besoin de R&D ?**

entreprise@instituts-carnot.eu  
www.instituts-carnot.eu



Préparer l'avenir industriel et économique  
avec un accompagnement R&D des entreprises  
pour leur stratégie d'innovation



La recherche  
pour l'innovation  
des entreprises

**Association des instituts Carnot**

120, avenue du Général Leclerc 75014 Paris

**www.instituts-carnot.eu**

**01 44 06 09 00**

**entreprise@instituts-carnot.eu**