

> dossier de
PRESSE

INRAE

**De la biomasse aux molécules
et matériaux innovants**

SOMMAIRE

01

La biomasse :
une diversité de ressources
p. 6-15

02

S'inspirer de la nature pour transformer
une matière complexe
p. 16-24

03

Filières décarbonées :
comment accompagner la transition
vers la bioéconomie
p. 25-33



Glossaire

p. 34

Contactes scientifiques

p. 35

ÉDITORIAL

De la biomasse aux molécules et matériaux innovants

Substituer le carbone d'origine renouvelable au carbone fossile. Voilà l'enjeu majeur de la bioéconomie, basée sur la production, la mobilisation, la transformation et le recyclage de la biomasse (végétaux et résidus provenant de l'agriculture, bois et résidus de la sylviculture, algues, microorganismes, coproduits de l'industrie*, déchets ménagers...). Ce passage d'une économie pétrosourcée à une économie circulaire de la biomasse apparaît plus que jamais essentiel pour atteindre l'objectif de zéro émission nette de gaz à effet de serre (GES) d'ici à 2050, prévu par la Stratégie nationale bas carbone ^[1] en miroir des stratégies européennes. Néanmoins, ce changement nécessite de mobiliser une part accrue de biomasse. De fait, cette mobilisation doit impérativement se faire en veillant à ce qu'elle :

- ❖ ne rentre pas en compétition avec l'utilisation des terres pour couvrir nos besoins alimentaires ;
- ❖ ne porte atteinte ni à la biodiversité des écosystèmes ni à la préservation des ressources, sol et eau notamment ;
- ❖ ne vienne pas en concurrence avec le rôle des écosystèmes, notamment des forêts et des sols, comme puits de carbone ;
- ❖ et s'inscrive dans la transition agroécologique.

Pour cela INRAE, acteur majeur de la bioéconomie dans les territoires, en a fait une de ses priorités stratégiques dans son document d'orientation [INRAE 2030](#).

Développer des filières locales exploitant la biomasse au plus près des activités permettra une bonne couverture territoriale sans ajouter des coûts de transport. Cela nécessite de tenir compte des itinéraires de transformation de tous les produits et coproduits, depuis les aliments jusqu'à l'extraction de molécules d'intérêt, la formulation de bio-carburants ou de matériaux afin de favoriser des usages en cascade et assurer ainsi la circularité de la bioéconomie.

La bonne nouvelle, c'est que les ressources pour y parvenir sont importantes. Avec plus de 16,9 millions d'hectares, la France est le quatrième pays européen en surfaces

[1] www.ecologie.gouv.fr/strategie-nationale-bas-carbone-snbc



boisées, qui constituent notre meilleur atout pour emprisonner les GES. Les scientifiques d'INRAE évaluent le potentiel de cette formidable ressource, à l'aune des 3 S :

- séquestration du carbone dans la biomasse ;
 - stockage du CO₂ dans les produits résultant de l'industrie du bois ;
 - substitution des matériaux pétrosourcés pour la chimie, l'énergie ou la construction.
- Une tâche délicate, d'autant qu'en raison du changement climatique, la forêt de demain sera bien différente de celle d'aujourd'hui. Les scientifiques d'INRAE développent des outils de modélisation et mènent des études socioéconomiques qui prennent en compte ces incertitudes, de manière à accompagner les acteurs de la filière forêt-bois dans leur réflexion et leurs prises de décision sur le long terme.

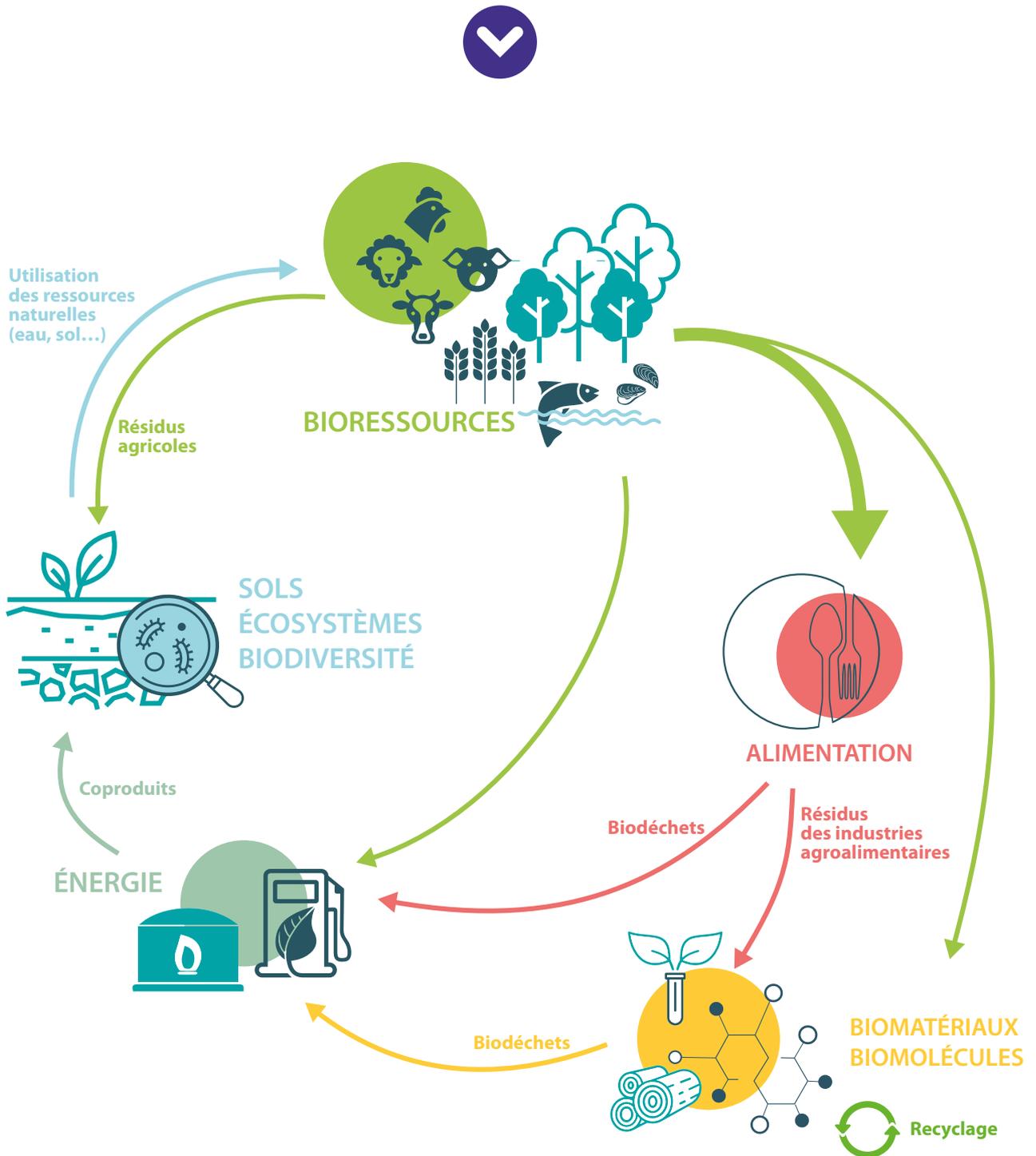
Les scientifiques étudient aussi de nouvelles façons d'exploiter cette ressource. Notamment en s'intéressant aux coproduits, trop souvent brûlés alors qu'ils regorgent de molécules qui intéressent la pharmacie, la cosmétique, la médecine ou la chimie et l'agro-industrie. Au-delà des arbres, ce sont tous les résidus de l'agriculture* qui pourraient être valorisés, pour remplacer les produits d'origine pétrosourcée dans de nombreuses applications. Béton de chanvre, isolants à base de lin ou de tournesol, caoutchouc en peau de tomate, plastique antimicrobien, crème antioxydante... Tous ces produits existent, mais développer de nouvelles applications implique de franchir la « vallée de la mort » qui sépare l'innovation scientifique de la production à l'échelle industrielle. Souvent en effet, de lourds investissements sont nécessaires pour adapter l'outil de production à ces nouveaux matériaux. Or, pour qu'ils se substituent à leurs équivalents issus de la pétrochimie, ils doivent offrir des services comparables et à un coût similaire. La transition vers la bioéconomie s'avère par conséquent difficile, mais la prise de conscience est aujourd'hui bien réelle. Les initiatives se multiplient pour accompagner ce changement de paradigme, comme cela est illustré dans ce dossier.



Coproduits de l'industrie: produit annexe d'un processus industriel, dont la fabrication n'est pas directement recherchée, mais qui peut être valorisé économiquement.

Résidus de l'agriculture: parties aériennes des végétaux non récoltées et laissées sur le sol dans les champs ou les vergers au moment de la récolte: les tiges et les chaumes, les feuilles et les gousses par exemple.

Boucler les cycles de la **bioéconomie**





© Adobe Stock

01.



La biomasse : une diversité de ressources

Au cours du XX^e siècle, l'extraction des matériaux de construction a été multipliée par 34, les minerais et minéraux par 27 et les énergies fossiles par 12, d'après le Programme des Nations unies pour l'environnement [1]. Ces ressources n'étant pas infinies, le recours à la biomasse devient plus nécessaire que jamais. À condition de l'exploiter de façon durable et raisonnée, et de développer de nouveaux usages pour les coproduits, encore trop souvent considérés comme des déchets. Vous ne regarderez plus les tiges de tournesol ou la peau des tomates de la même façon.

[1] www.resourcepanel.org/reports/decoupling-natural-resource-use-and-environmental-impacts-economic-growth



Valoriser les ressources insoupçonnées de la biomasse

Les richesses insoupçonnées du bois

Les arbres recèlent de grandes quantités de composés chimiques extractibles par l'eau et/ou l'éthanol. Certains compartiments, tels que l'écorce, le duramen* et les nœuds, en sont particulièrement riches. Or, lors de la transformation industrielle du bois, ces compartiments constituent majoritairement des résidus le plus souvent brûlés pour fournir de l'énergie ou utilisés pour fabriquer du mulch horticole* dans le cas de l'écorce. Afin d'évaluer l'importance de cette ressource, et les conditions requises pour le développement d'une filière forêt-chimie, le projet EXTRAFOR_EST (2017-2021) a mesuré la quantité de composés chimiques présents dans ces différents compartiments, pour des chênes, hêtres, sapins, épicéas et douglas présents, exploités et transformés par l'industrie du bois, dans les régions Grand Est et Bourgogne-Franche-Comté. Grâce aux informations acquises dans le cadre de trois thèses et trois postdoctorats, et aux données fournies par l'IGN* et l'institut technologique FCBA*, les chercheurs ont pu déterminer la quantité maximale des ressources de l'ensemble de cette biomasse et des quantités de composés extractibles. Pour préciser la part réellement disponible pour l'industrie, ils ont construit un assemblage de modèles qui quantifie les quantités de bois qui transitent par des unités de transformation, scieries et papeteries notamment. Cet assemblage permet de connaître avec précision la quantité de coproduits (écorces, sciures...) disponibles. En parallèle, une étude a identifié, sur le plan national et international, les principaux marchés susceptibles de valoriser ces composés chimiques extractibles : la cosmétique, les compléments alimentaires pour les hommes et les animaux, les produits de biocontrôle* et de biostimulation* des cultures. Bien que le projet EXTRAFOR_EST visait seulement à acquérir des connaissances sur les ressources et les marchés, les réunions publiques organisées régulièrement à mesure de l'avancée des travaux ont suscité des vocations. Ainsi, deux filières forêt-chimie sont en cours de constitution dans les deux régions étudiées : la première à proximité d'Epinal (88), sous l'appellation WoodChem Valley, et la seconde, appelée Kémyos, autour du Parc national des forêts, près d'Arc-en-Barrois (52). Pour compléter l'étude et aider les filières à se développer, la caractérisation des propriétés fonctionnelles des composés a été lancée en 2021.



© Adobe Stock



Duramen : partie interne du bois, correspondant aux zones d'accroissement les plus anciennement formées, qui ne comportent plus de cellules vivantes.

Mulch horticole : couche de matériau protecteur (copeaux, pailles, écorces...) posée sur le sol. Elle a plusieurs fonctions : contrôler la levée des adventices, protéger le sol contre les intempéries et l'érosion, préserver l'humidité et l'azote du sol...

IGN : Institut national de l'information géographique et forestière.

FCBA : centre technique industriel français, chargé des secteurs de la forêt, de la cellulose, du bois-construction et de l'ameublement.

Biocontrôle : ensemble des méthodes de protection des végétaux qui utilisent des organismes vivants ou substances naturelles pour prévenir ou réduire les dommages causés par des organismes nuisibles (ravageurs, plantes adventices et pathogènes).

Biostimulation : utilisation de substances inertes ou des microorganismes dont l'objectif est d'améliorer le fonctionnement de la plante, du sol ou les interactions entre sol et plante.

La gemme, naturelle par essence

Portée par la demande croissante en produits d'origine naturelle, le gemmage est une activité ancestrale qui connaît un regain d'intérêt. Ce procédé consiste à collecter l'oléorésine que les résineux produisent pour cicatrifier la blessure que l'on opère sur le tronc, qui s'appelle communément la gemme. La technique employée aujourd'hui, mise au point par l'entreprise bourguignonne Holiste, consiste à réaliser une pique circulaire dans l'écorce pour atteindre, si possible sans l'endommager, le cambium*, puis à appliquer une pâte sur la plaie pour retarder la cicatrisation, et à fixer un réservoir étanche pour recueillir l'oléorésine et éviter l'évaporation des composés volatils. Une fois purifiée et distillée, on obtient la colophane et l'essence de térébenthine. Celle-ci est riche en éléments chimiques, employés en médecine, en cosmétique ou en droguerie. En Europe, le gemmage est aujourd'hui presque exclusivement pratiqué sur les pins maritimes. Mais la plupart des résineux produisent de la gemme après une blessure, et des pratiques anciennes de gemmage sur d'autres essences ont été retrouvées dans certaines régions. Alors pourquoi ne pas relancer cette activité sur d'autres essences, par exemple le mélèze, l'épicéa, le sapin ou le pin sylvestre qui abondent dans la région Grand Est ? C'est ce qu'ont étudié les chercheuses et les chercheurs d'INRAE Grand Est-Nancy et de l'université de Lorraine, dans le cadre du projet GEMM_EST. Durant deux ans, ils ont mené des travaux visant à compléter les connaissances des composés chimiques présents dans les exsudats* de 5 espèces de résineux, à mesurer les rendements annuels en molécules extraites et à étudier les mécanismes de production d'oléorésine suite à une blessure. Résultat, c'est le pin sylvestre qui s'est avéré le plus productif : 500 g par arbre et par an. Bien moins que le pin maritime (3,5 kg par arbre et par an), mais suffisamment pour envisager le développement d'une filière forêt-chimie au niveau local. Le gemmage pourrait notamment être pratiqué dans les dernières années précédant la coupe de l'arbre, assurant ainsi un complément de revenus au propriétaire.



Cambium: tissu cellulaire des tiges et des racines qui donne naissance au bois et au liège.

Exsudat: substances organiques complexes, plus ou moins fluides, qui suintent de certaines espèces de plantes, généralement des arbres, dont l'objectif est de cicatrifier la blessure.



© INRAE - UMR Silva-GE

Les multiples usages des os

Quel gâchis ! Entre 30 et 50 % du poids des animaux destinés à l'alimentation humaine sont des résidus. Quand ils ne sont pas directement incinérés, ils sont utilisés pour nourrir les animaux de compagnie ou pour la fabrication d'huiles techniques. La valorisation de ces sous-produits est aujourd'hui minimale alors qu'ils recèlent des trésors ! Décortiquez un os de bovin, une tête de volaille ou un pied de mouton et vous y trouverez des molécules dotées de propriétés quasi impossibles à répliquer par synthèse chimique. Par exemple, on produit depuis longtemps des antioxydants synthétiques dont l'unique fonction est d'améliorer la conservation des aliments auxquels ils sont ajoutés. Ils remplissent parfaitement cette fonction mais peuvent altérer le goût, la texture voire la digestibilité des aliments. Or, les chercheurs d'INRAE ont isolé dans les os de bovins des molécules antioxydantes qui, en raison de leur compatibilité biologique, ne modifient pas les propriétés de la viande. Ces molécules animales présentent en outre des avantages nutritionnels et peuvent ainsi être à la fois antioxydantes, antidiabétiques et anti-hypertenseurs. Les chercheurs qui étudient ces sous-produits imaginent et expérimentent de multiples nouveaux champs d'application : emballages dotés de propriétés antioxydantes et antimicrobiennes qui protégeraient naturellement les aliments ; biofiltres pour la dépollution des eaux usées ; crèmes cicatrisantes ou hémostatiques ; cosmétiques... Le champ est vaste ! L'ambition des chercheurs est d'augmenter l'efficacité des ressources disponibles en convertissant ces résidus en matières premières à forte valeur ajoutée susceptibles de soutenir, et d'accompagner les acteurs de la filière dans un contexte de transition alimentaire. Les éleveurs, qui sont aujourd'hui rétribués uniquement pour la viande, sont bien évidemment concernés mais également les abattoirs, où le traitement et l'évacuation des résidus peut coûter jusqu'à 300 000 euros par an. Dans le cadre de la bioéconomie, et conformément au modèle de l'économie circulaire, il conviendra d'exploiter localement cette ressource, non seulement pour réduire l'impact des transports mais aussi pour dynamiser les territoires.



© Adobe Stock



Le miscanthus: une plante durable à fort potentiel

C'est un modèle de vertu. Vaste plante au port élégant, qui peut atteindre plusieurs mètres de hauteur, le miscanthus est peu cultivé en France. Mais les choses pourraient rapidement évoluer, tant il constitue une formidable source de biomasse lignocellulosique*. Surtout, sa culture nécessite très peu d'engrais car d'une année sur l'autre, pour sa croissance, le végétal mobilise l'azote et les minéraux stockés durant l'hiver dans son rhizome*. Quant au carbone, il est piégé dans les parties aériennes de la plante et évacué lors de la récolte. Comme il s'agit d'une espèce pérenne, sa culture ne demande ni entretien, ni travail du sol, à part pour la préparation de l'implantation de la culture et sa destruction au bout de 15-20 ans, ce qui favorise le développement des communautés de microorganismes importantes pour stimuler les défenses de la plante contre des bioagresseurs. Par ailleurs, cette culture ne nécessite pas de traitement phytosanitaire au point que le miscanthus peut être planté dans les zones de captage d'eau, où toute agriculture intensive et usages d'engrais et pesticides sont proscrits. Ainsi, sa culture n'empiète pas sur les terres nécessaires à l'alimentation humaine. Employée jusqu'ici essentiellement pour la litière animale et le paillage horticole, et depuis peu comme additif pour l'alimentation des vaches laitières, la plante intéresse désormais les industriels. Par exemple pour la fabrication de béton, ou de matériaux composites* en remplacement de la fibre de verre. Mais malgré ses atouts, le miscanthus peine à se développer (la production nationale n'est que de 8 000 hectares environ). Notamment parce que la variété présente en France est triploïde*, donc stérile, et ne se développe que par multiplication végétative. Les coûts d'installation de la culture sont donc assez élevés, environ 3 000 € par hectare. Même si les frais sont amortis sur la durée, la plante vivant plus de 20 ans, ces investissements constituent un frein pour de nombreux agriculteurs, encore incertains de vendre la biomasse produite. Et à l'autre bout de la chaîne, la faible quantité de matières premières disponibles n'incite guère les industriels à exploiter cette ressource. C'est le serpent qui se mord la queue ! La solution consisterait à employer des variétés de miscanthus multipliées par graines fertiles, mais le souci est que cette plante pourrait être invasive. Pour contourner ce problème, les chercheurs étudient actuellement le développement de variétés de miscanthus hybrides triploïdes, obtenues par croisements, capables de produire de grandes quantités de graines donnant lieu à des plantes stériles. Celles-ci permettraient de réduire considérablement les coûts de démarrage de la culture tout en évitant sa propagation incontrôlée. Les premiers essais en champ pourraient débiter dans quelques années.



© Adobe Stock



Biomasse lignocellulosique: constituant principal de la paroi cellulaire des plantes. Elle est la source de carbone renouvelable la plus abondante de la planète. Elle est constituée de 3 éléments majeurs qui sont la cellulose, l'hémicellulose et la lignine.

Rhizome: tige souterraine remplie de réserve alimentaire de certaines plantes vivaces qui porte les racines et les tiges aériennes.

Matériau composite: assemblage d'au moins deux composants différents non miscibles dont les propriétés se complètent.

Plante triploïde: plantes possédant 3 paires de chromosomes au lieu des 2 habituellement.



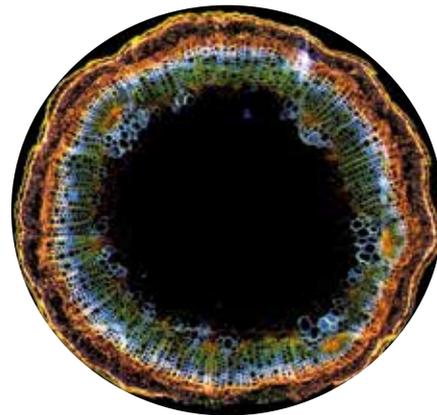
Des fibres végétales pour des écomatériaux



© Adobe Stock

Dans le lin, tout est bien

La France est le premier producteur mondial de lin textile, cultivé principalement en Normandie, la plante ayant besoin de beaucoup d'humidité, y compris en été. Les averses estivales permettent en effet le rouissage*, opération durant laquelle le lin est couché sur le sol pour que les microorganismes en digèrent partiellement les tiges, facilitant ainsi l'extraction des fibres. Durant des millénaires, les longues fibres de lin ont été employées pour la fabrication de tissus tandis que les anas, les fragments de paille récupérés lors du teillage (la séparation des fibres textiles du reste de la plante), servaient de paillage ou de litière pour les animaux. Aujourd'hui, l'ensemble de la plante est utilisé pour répondre aux nouvelles attentes du marché. Incorporées à divers polymères*, les fibres servent à la fabrication de matériaux composites dont la qualité d'usage est améliorée grâce aux propriétés mécaniques remarquables du lin. En outre, à performances mécaniques égales, ces fibres naturelles sont plus légères que les fibres synthétiques telles que la fibre de verre. Ainsi, l'industrie automobile commence à les employer pour le garnissage des coffres, tableaux de bord ou portières. Ces biomatériaux contribuent à réduire le poids des véhicules et donc leur consommation de carburant. Dans le bâtiment, on installe également des panneaux composites à base de lin pour augmenter l'isolation thermique et phonique. Enfin, la fibre de lin, associée au carbone, confère d'excellentes capacités d'absorption des vibrations que le carbone seul ne possède pas. Ce matériau composite hybride dissipe ainsi jusqu'à 40 % de l'énergie qu'il reçoit. Les applications sont nombreuses, allant de la raquette de tennis au cadre de vélo en passant par les coques de bateaux.



© INRAE - J. Beaugrand



Rouissage: macération que l'on fait subir aux plantes textiles telles que le lin ou le chanvre pour faciliter la séparation de l'écorce filamenteuse avec la tige.

Polymère: macromolécules qui sont formées par un enchaînement de petites molécules (par exemple l'amidon est un polymère constitué de molécules de glucose).



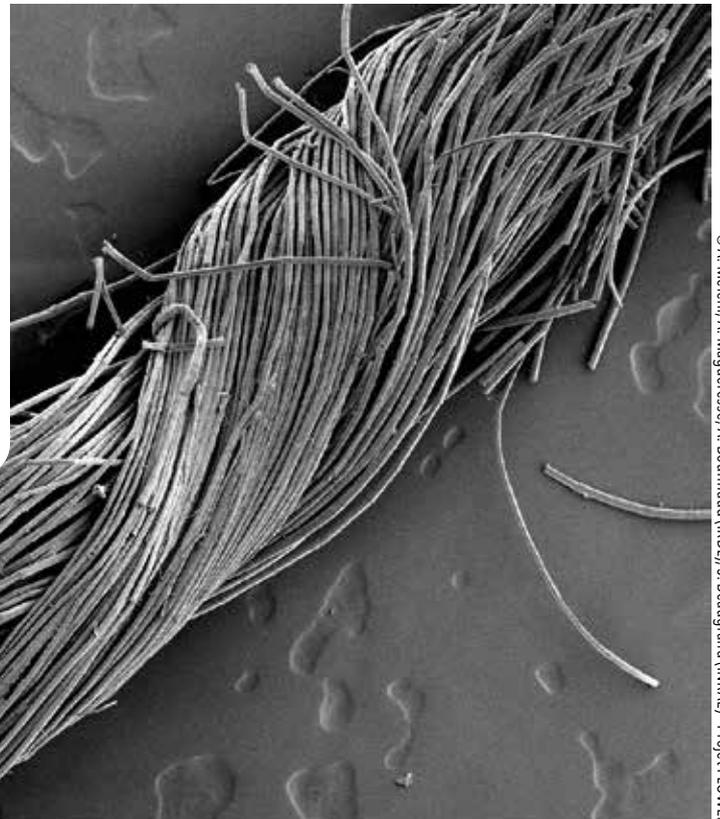
Alors, le lin serait-il le candidat idéal pour remplacer les polymères issus du pétrole ? Si les atouts de cet écomatériau apparaissent remarquables, son coût demeure relativement élevé par rapport à d'autres fibres exotiques et sa durabilité reste encore à démontrer. Pour éclairer ce dernier point, des chercheurs français, notamment d'INRAE, et italiens ont conduit une étude dont les résultats montrent que les fibres de lin sont sensibles aux variations de température et d'hygrométrie ou au contact de certains composants chimiques ou organiques (voir encadré). Paradoxalement, ces propriétés, qui peuvent apparaître comme une faiblesse, constituent un réel avantage pour le recyclage des matériaux composites en fin de vie, recyclage qui est actuellement extrêmement compliqué en raison de la difficulté à séparer les différents polymères les uns des autres. L'emploi d'écomatériaux à base de lin, dont les propriétés mécaniques restent optimales pendant 15 ans, serait tout à fait indiqué pour la fabrication d'objets dont la durée de vie utile est relativement courte, comme certaines pièces mécaniques ou encore les filets de pêche. Les caractéristiques des fibres de lin faciliteront la phase de recyclage et éviteront une pollution durable de l'environnement en cas de perte ou de casse.



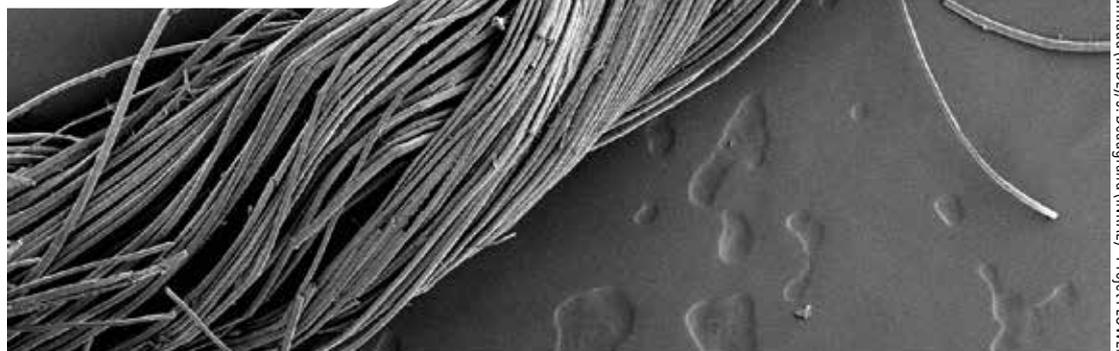
© Adobe Stock

Lin durable, l'autre non

Remplacer les polymères pétrosourcés par la fibre de lin, c'est évidemment tentant pour réduire notre empreinte carbone. Mais qu'en est-il de la durabilité de ces nouveaux matériaux ? C'est ce qu'ont entrepris de vérifier des scientifiques, notamment d'INRAE, via une approche pour le moins originale. Ils ont en effet prélevé des fibres de lin sur 4 tableaux italiens peints aux XVII^e et XXVII^e siècles afin d'en analyser la composition et la structure à l'échelle nanométrique. Ils ont alors constaté que le matériau avait subi des dégradations marquées dues à des phénomènes d'oxydation, à des attaques de champignons, aux variations d'humidité et de température et à la pollution de l'air, ainsi qu'à la tension de la toile durant plusieurs centaines d'années. D'autres dommages provenaient des colles et peintures utilisées lors de la conception des œuvres ou à l'occasion de restaurations. En comparaison, des fibres de lin provenant d'un linge mortuaire égyptien vieux de 4 000 ans présentaient un bien meilleur état de conservation ! Ces travaux sont essentiels pour comprendre le processus de vieillissement des fibres de lin et ainsi prévoir quelle sera leur durabilité une fois associées à d'autres polymères. Il s'agira, selon l'application recherchée, de garantir la durabilité des fibres de lin la plus longue possible ou au contraire d'en accélérer la dégradation.



© A. Meilili, A. Magueresse, A. Bourmaud (IRD), J. Beaugrand (INRAE) - Projet FLOWER



Fil de lin centenaire.

Le tournesol du sol au plafond

La récolte du tournesol vient de s'achever et dans les champs ne subsistent plus que les tiges. Et que fait-on de ces dernières ? Très peu de choses. Elles peuvent être laissées sur place et apporter un peu de fertilisation, ou ramassées et brûlées, mais pour des rendements énergétiques faibles. Pourtant, quand on regarde ces tiges d'un peu plus près, leur structure interpelle. L'enveloppe est constituée de fibres très résistantes, qui protègent la moelle très poreuse dont la texture rappelle le polystyrène. Pour les chercheurs, ces matériaux semblent présenter des propriétés mécaniques et thermiques intéressantes. Mais encore faut-il le démontrer. Dans le cadre du projet Demether (2011-2015), les scientifiques ont entrepris d'explorer de nouvelles voies de valorisation de ces coproduits, et notamment leur utilisation dans la fabrication de panneaux isolants pour le bâtiment. En variant le ratio fibres-moelle, la granulométrie ou encore la compression, ils sont parvenus à obtenir un matériau suffisamment performant pour rivaliser avec les panneaux traditionnels. Et surtout, intégralement biosourcé puisque la colle employée pour lier les particules est constituée de chitosane, extraite de la chitine qui compose les carapaces des crustacés. Peu coûteux, durables et renouvelables, ces produits ont tout pour plaire. Ils ne permettront pas à eux seuls de remplacer les panneaux pétrosourcés, d'autant qu'ils ne conviennent pas à tous les usages, mais ils représentent un atout supplémentaire pour accompagner le secteur du bâtiment dans la transition énergétique.



© INRAE - B. Nicolas



Des matériaux innovants à base de coproduits alimentaires

Les bioplastiques, ça nous emballe!

Les plastiques asphyxient la planète. Si l'on mesure aisément leur impact en termes d'émissions de CO₂, on omet trop souvent le désastre écologique qui se profile avec les mégatonnes de micro et nanoparticules de plastiques qui s'accumulent pour des centaines d'années dans nos sols et dans nos océans. La prise de conscience, bien que tardive, est réelle, comme le montre notamment la loi AGEC (anti-gaspillage pour une économie circulaire) qui vise à mettre fin aux plastiques à usage unique et interdit désormais l'usage des plastiques pour l'emballage des fruits et légumes frais. Y parvenir implique néanmoins un profond changement des usages et mentalités de tous les acteurs, depuis l'industriel jusqu'au citoyen consommateur. C'est aux scientifiques qu'il incombe de développer des solutions pour réduire notre consommation de plastiques pétrochimiques persistants en développant, par exemple, des matériaux alternatifs capables d'apporter les mêmes fonctionnalités utiles que les plastiques tout en étant exempts de leur rémanence dans l'environnement. Les chercheurs, notamment d'INRAE, sont parvenus à relever cet immense défi en élaborant des bioplastiques destinés à l'emballage alimentaire à partir de résidus liquides et de coproduits des productions agricoles. Les liquides, constitués des eaux de lavage des huileries ou des laiteries et des effluents urbains, sont employés comme substrat de fermentation pour des bactéries qui stockent du PHA, un polyester biodégradable. Ce dernier est ensuite associé à des coproduits solides de productions agricoles tels que les sarments de vigne, la paille ou le fumier dans des proportions ajustables selon les besoins de conservation des aliments. Les chercheurs ont également développé des outils de modélisation et d'aide à la décision selon une approche intégrée de l'économie circulaire afin de concevoir des matériaux qui puissent être réutilisables, recyclables et biodégradables. Il s'agit en effet d'harmoniser toutes les étapes de leur cycle de vie, depuis la création de la matière première en passant par l'usage du produit jusqu'à son devenir après usage, c'est-à-dire son recyclage puis sa disparition totale dans les cycles naturels de notre écosystème. Le projet NoAW, récompensé en 2021 par les Étoiles de l'Europe*, illustre brillamment ce concept. Une bioraffinerie pilote a ainsi été développée à Vérone en Italie pour coupler, grâce à un processus de digestion anaérobie en deux étapes des effluents, production de bioénergie par méthanisation et production de PHA.

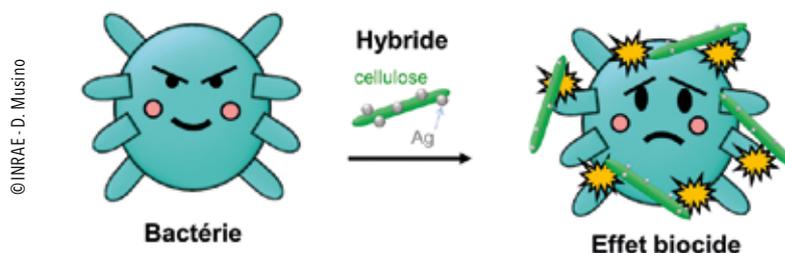


© INRAE - B. Nicolas



Trophée Les Étoiles de l'Europe: il récompense chaque année 12 lauréats pour leur engagement européen et leur travail de coordination de projets de recherche au service d'enjeux sociétaux majeurs.

Un biocide au cœur vert



Les propriétés antimicrobiennes de l'argent sont connues depuis l'Antiquité. Son utilisation est cependant sujette à caution en raison de son action néfaste sur l'environnement. Ainsi, si l'on employait le métal pur jusqu'au siècle dernier, c'est désormais sous forme de nanoparticules qu'il est utilisé. On en trouve aussi bien dans les cosmétiques que dans les emballages alimentaires, les produits ménagers, le matériel dentaire, les dispositifs de traitement de l'eau ou encore les peintures. Pourquoi sous forme de nanoparticules ? Parce que plus une particule est petite, plus son rapport surface sur volume augmente, autrement dit plus sa zone d'échange avec l'environnement est importante. Ainsi, la quantité d'argent utile pour obtenir un résultat donné est bien plus faible quand ce métal est utilisé sous forme de nanoparticules. La toxicité des nanoparticules d'argent pour l'environnement n'en demeure pas moins préoccupante. D'autant plus que les nanoparticules actuellement utilisées se présentent sous forme d'agrégats, alors que seules les particules situées à la surface, à proximité des bactéries, sont utiles. L'idéal serait donc de ne conserver qu'une enveloppe en argent et de remplacer le cœur des nanoparticules par un matériau biosourcé sans danger pour l'environnement. C'est la piste qu'explorent depuis plusieurs années des chercheuses et chercheurs d'INRAE et leur choix s'est porté tout naturellement sur la cellulose*, le biopolymère le plus abondant sur Terre. Diverses formulations, dans lesquelles variaient la quantité, la forme et la taille des nanoparticules d'argent ancrées à la surface de nanocristaux de cellulose, ont été testées. Les scientifiques sont ainsi parvenus à obtenir une activité antibactérienne optimale, à l'aide de nanocristaux constitués de 20 % de nanoparticules d'argent et 80 % de cellulose. Au-delà de son gain d'efficacité, cet hybride possède l'avantage de se disperser aisément dans les liquides. Il pourrait ainsi être employé dans des peintures qui, une fois appliquées et sèches, conserveraient leurs propriétés biocides. En présence de bactéries, les nanoparticules d'argent se dissolvent et perdent leur toxicité ; ne reste alors que le cœur de cellulose biodégradable. Et si l'hybride n'entre pas en contact avec les bactéries au cours de son cycle de vie, la faible quantité de nanoparticules d'argent qui le composent limite de façon importante les dommages sur l'environnement.



Cellulose: matière contenue dans la paroi des cellules végétales, notamment utilisée dans la fabrication de papier et de textiles.

Dispositif INRAE pour la bioéconomie

Nom: plateforme BIBS – Bioressources: imagerie, biochimie et structure

Démarrage: 2012

Lieu: INRAE Pays de la Loire - Nantes

Effectif: 20 personnes

Capacité: plus de 50 projets traités chaque année (nationaux, européens et internationaux).

Objectifs: caractérisation multimodale de la biomasse naturelle (plantes, cellule...) ou transformée (biomatériau, aliments) de l'échelle de la molécule à celle de l'objet avec 3 missions principales:

- ▶ apporter une expertise et un appui analytique à la communauté scientifique publique et privée;
- ▶ réaliser des développements méthodologiques innovants;
- ▶ mettre à disposition certains équipements auprès d'utilisateurs formés.

Champs d'applications dans les domaines du végétal et de l'agroalimentaire, de la chimie verte, des biomatériaux, de l'industrie cosmétique et santé, de l'environnement et la biologie marine.

Outils: équipements scientifiques au plus haut niveau dans quatre domaines analytiques:

la spectrométrie de masse, la microscopie, la résonance magnétique nucléaire et le phénotypage chimique. BIBS bénéficie également de l'appui d'un groupe de bioinformatique dédié.

www.bibs.inrae.fr



Du caoutchouc en peau de tomate

L'agro-industrie est gourmande de fruits et légumes qu'elle transforme en d'innombrables aliments, depuis les compotes jusqu'aux sauces, en passant par les jus. Les drêches, constituées des peaux et pépins, sont actuellement peu ou pas valorisées. Or elles sont produites en grandes quantités – l'industrie de la tomate génère à elle seule 1,5 million de tonnes de déchets chaque année. Depuis des décennies, les scientifiques d'INRAE s'intéressent à la structure et à la fonction de la peau de la tomate, aussi appelée cuticule. Celle-ci constitue l'interface entre le fruit et son environnement et son étude s'avère indispensable pour sélectionner les plantes les mieux adaptées pour résister aux différentes agressions, comme les attaques par des pathogènes ou la sécheresse. Une meilleure connaissance de cette structure végétale s'avère également précieuse pour envisager toutes les possibilités de valorisation.



La peau des fruits est en effet un organe remarquable. Extrêmement fine, elle est à la fois hydrophobe et insoluble, mais aussi très élastique, une propriété que les scientifiques d'INRAE tentent d'exploiter. Ils ont ainsi élaboré un procédé permettant de déconstruire la cuticule et de libérer ses constituants, dont des acides gras hydroxylés*. Comme on le ferait avec des briques de Lego®, ces molécules peuvent être réassemblées pour construire un nouveau polymère. Ainsi les scientifiques d'INRAE ont créé un « caoutchouc » 100 % naturel et biodégradable dont les propriétés, notamment d'élasticité et d'antifouling*, peuvent être modifiées sur mesure, pour répondre aux différents usages. Pour ce faire, il suffit simplement de modifier le schéma d'assemblage ! Malgré l'intérêt de ce « caoutchouc » d'un nouveau genre, on ne mangera jamais assez de sauce tomate pour subvenir aux besoins de l'industrie du pneu ! Cet éco-matériau serait néanmoins idéal pour subvenir aux besoins d'autres marchés à faible volume et à forte valeur ajoutée ou encore pour la fabrication de matériaux composites.

La mémoire dans la peau

L'utilisation des acides gras hydroxylés pour la conception de biomatériaux en est encore au stade du prototype, mais une autre application de ces monomères* de cutine est bien plus avancée. Il s'agit là encore d'une belle illustration de biomimétisme*. Les plantes ne possèdent pas de système immunitaire mais elles savent se défendre. Par exemple, lorsqu'un champignon tente de s'y introduire, il produit une enzyme pour couper la cutine. En réponse à cette attaque, la peau libère des acides gras hydroxylés qui préviennent la plante de l'agression. Après avoir identifié ce mode de fonctionnement, les chercheurs ont eu l'idée d'utiliser ces « lanceurs d'alerte » pour créer un stimulateur de défense des plantes (SDP), autrement dit un « vaccin » destiné à déclencher son mécanisme de défense, de manière à lui conférer un coup d'avance en cas d'attaque et de limiter ainsi le recours aux produits phytosanitaires. Le procédé a été validé et breveté en 2018 et les chercheurs, en partenariat avec la société SDP (Groupe Rovensa), développent maintenant une bioraffinerie destinée à isoler de grandes quantités de monomères d'acides gras hydroxylés par ailleurs largement utilisés comme additifs ou stabilisants par les industries alimentaire, chimique, cosmétique ou pharmaceutique.



Acide gras hydroxylé:

composés d'origine naturelle disponibles dans la plupart des êtres vivants, jouant un rôle essentiel dans le métabolisme, notamment pour le maintien de la membrane ou d'autres structures cellulaires.

Antifouling: peinture destinée à empêcher les organismes marins de se fixer sur la coque des navires ou de tout autre matériau immergé.

Monomère: composé constitué de molécules simples, et capable de former des polymères.

Biomimétisme: processus d'innovation et ingénierie qui s'inspire des formes, des matières, des propriétés, des processus et des fonctions des êtres vivants.



© INRAE - B. Nicolas

02.



S'inspirer de la nature pour transformer une matière complexe

Lignine, chitine, cellulose sont d'inépuisables réservoirs de molécules, qui sont un carburant essentiel de la chimie verte. Mais ces composés, qui contribuent à la résistance et la protection des plantes et champignons, sont particulièrement difficiles à dégrader. Certains organismes, les termites par exemple, y parviennent pourtant sans difficulté. Dans une approche de biomimétisme, les chercheurs s'inspirent du vivant pour mettre au point des procédés de transformation de ces composés, respectueux de l'environnement et transférables vers l'industrie.



Les trésors qui se cachent dans la biomasse

Cent molécules, d'une seule traite

Si les premiers essais pour mettre au point un herbicide biosourcé 100 % efficace sont encourageants, il reste encore de nombreux travaux à mener pour y parvenir. Et il ne s'agirait là que d'une application parmi d'autres, rendue possible par la compréhension des voies de biosynthèse et les interactions plante-bioagresseurs. Grâce à ces connaissances, les scientifiques d'INRAE identifient des molécules impliquées dans la défense des plantes, mais ayant potentiellement d'autres intérêts, comme des propriétés anti-inflammatoires ou antioxydantes. Ces recherches, encore récentes, tirent leur origine d'un constat simple. Depuis 500 millions d'années, les plantes n'ont cessé d'évoluer pour s'adapter à leur environnement. Elles ont notamment développé des mécanismes de défense, basés sur la production de molécules toxiques pour leurs agresseurs naturels mais qui, une fois isolées, voire modifiées, peuvent rendre de nombreux services. Ces molécules se comptent déjà par milliers, mais il en reste pléthore à découvrir. Pour y parvenir, des chercheuses et chercheurs de l'Institut national polytechnique de Lorraine et d'INRAE ont développé une technologie aussi révolutionnaire qu'efficace : les plantes à traire ! Et c'est l'entreprise PAT (Plant advanced technologies) qui la met en œuvre depuis 2005. Dans des vastes serres poussent des centaines de végétaux d'espèces et d'origines diverses. Mais ce sont leurs racines qui sont l'objet de toutes les attentions. Stimulées, elles émettent des centaines de molécules qui sont récupérées à l'occasion de coupes ponctuelles, sans dommage pour la plante. Ces extraits de racines sont alors analysés par les partenaires spécialisés, dont INRAE fait partie, dans les différents champs d'exploration de la biologie, pour finalement identifier les molécules et leurs actions : herbicide, anti-inflammatoire ou encore antifongique, etc. Sachant, et c'est une bonne surprise, que certaines peuvent cumuler plusieurs propriétés, et intéresser à la fois l'industrie pharmaceutique, la cosmétique et l'agro-industrie.



© Adobe Stock

Née des résultats d'INRAE

Start-up issue des résultats d'INRAE: PAT – Plant advanced technologies

Création: 2005

Siège: Vandœuvre-lès-Nancy (54)

Activités:

- › Expertise dans le domaine des biotechnologies végétales pour renforcer l'utilisation industrielle des plantes comme plateformes de production de molécules d'intérêt.
- › Expertise dans le domaine de la chimie verte pour l'amélioration d'extraits végétaux en vue d'augmenter la valeur et les activités biologiques des produits d'intérêt.
- › Création en 2020 d'une filiale, Cellengo, pour le développement d'actifs végétaux par synthèse microbienne.

www.plantadvanced.com

Les termites, des insectes pleins de ressources

Élever des termites pour en exploiter les ressources cachées ! Telle est l'entreprise à laquelle des chercheurs d'INRAE ont souhaité contribuer, en s'associant à la société Ynsect et à un laboratoire de l'université Paris-Est Créteil. La carapace des termites est constituée de chitine, un polysaccharide* qui trouve des applications en pharmacologie, cosmétique ou agriculture, tandis que la pulpe représente une source de protéines et lipides pour l'alimentation animale. Dans le cadre du projet ZELCOR (2016-2021), le défi n'était pas tant d'extraire ces ingrédients d'intérêt à partir de la biomasse d'insectes que d'arriver à alimenter des colonies avec des coproduits de l'industrie papetière et de la fabrication de biocarburant. En effet, si certaines espèces sont habituées à consommer du bois, il est beaucoup plus difficile pour elles de s'accommoder de produits pauvres en cellulose et contenant des composés chimiquement complexes et résistants, tels que les lignines et les humines*. Ces résidus industriels de transformation de la lignocellulose sont le plus souvent brûlés pour fournir de l'énergie. Or, non seulement la combustion émet du CO₂, mais la valeur ajoutée de cette transformation est faible. En parallèle du développement d'un dispositif d'élevage de termites, les chercheurs du projet ZELCOR ont conçu un procédé d'extractions successives (fractionnement) qui permet d'exploiter tout le potentiel des lignines et de fournir un substrat adapté à l'alimentation des colonies. L'un des extraits obtenus combine plusieurs activités biologiques pouvant être fortement valorisées. Outre ses propriétés antioxydantes et antimicrobiennes, il présente une action répulsive vis-à-vis des insectes, qui pourrait fortement intéresser les fabricants d'emballages alimentaires. C'est en observant le changement de comportement des termites nourries avec différentes fractions de lignines que les entomologistes du projet ont mis le doigt sur cette propriété répulsive, exploitée par la suite par les chimistes pour la formulation de plastiques bioactifs : de l'intérêt de la recherche interdisciplinaire !



© Adobe Stock



Polysaccharides : molécules complexes faisant partie de la famille des glucides et constituées d'un grand nombre de monomères de sucres. La cellulose et l'amidon sont des polysaccharides.

Humines : matières organiques des sols insolubles dans les solutions alcalines et les solutions acides, telles que l'humus.

De l'huile sur mesure grâce à la cameline

La cameline est de retour. Cultivée en Europe durant plusieurs milliers d'années, cette plante oléagineuse a presque disparu durant le XX^e siècle, remplacée par des espèces à meilleurs rendements, telles que le colza ou le tournesol. Mais à présent qu'il est urgent d'accélérer la transition agroécologique de l'agriculture, la cameline redevient attrayante. D'autant que cette plante rustique fait montre d'une étonnante résistance aux stress biotiques ou abiotiques* et se satisfait de sols relativement pauvres. Utilisée en mélange, par exemple avec des pois ou des lentilles, elle sert de tuteur à ces plantes fragiles, leur offrant un meilleur accès à la lumière, tout en les éloignant du sol, les protégeant ainsi de certains microorganismes pathogènes. Et l'on peut aussi l'employer en interculture. Mais la cameline intéresse aussi les chercheurs, qui l'utilisent comme plante modèle, au même titre que la célèbre arabette des dames (*Arabidopsis thaliana*). Bien qu'un peu plus complexe que cette dernière d'un point de vue génétique, elle offre certains avantages. Occupant peu d'espace, produisant des graines plus grandes et donc plus manipulables, elle dispose surtout de 3 sous-génomes, comme le colza ou la plupart des céréales. Son étude permet donc de mieux comprendre comment interagissent ces sous-génomes, par exemple lors de la reproduction. Les chercheurs s'en servent aussi pour expérimenter la modification de gènes par Crispr-Cas9, dans un contexte génomique plus complexe que celui d'*A. thaliana*. D'autant que sa croissance rapide permet de mesurer les effets des mutations bien plus vite qu'avec le colza. Les chercheurs peuvent ainsi obtenir des camelines produisant des huiles de composition et de qualité différentes, adaptées à l'industrie, à la santé et l'alimentation humaine et animale ou à la cosmétique. Par exemple, une cameline à très haute teneur en oméga-3 (l'huile de cameline est naturellement riche en acides gras polyinsaturés) pourrait être employée pour nourrir les saumons d'élevage, en remplacement des farines animales ou encore pour produire une huile adaptée à la composition de peintures et lubrifiants.



© INRAE - J.D. Faure

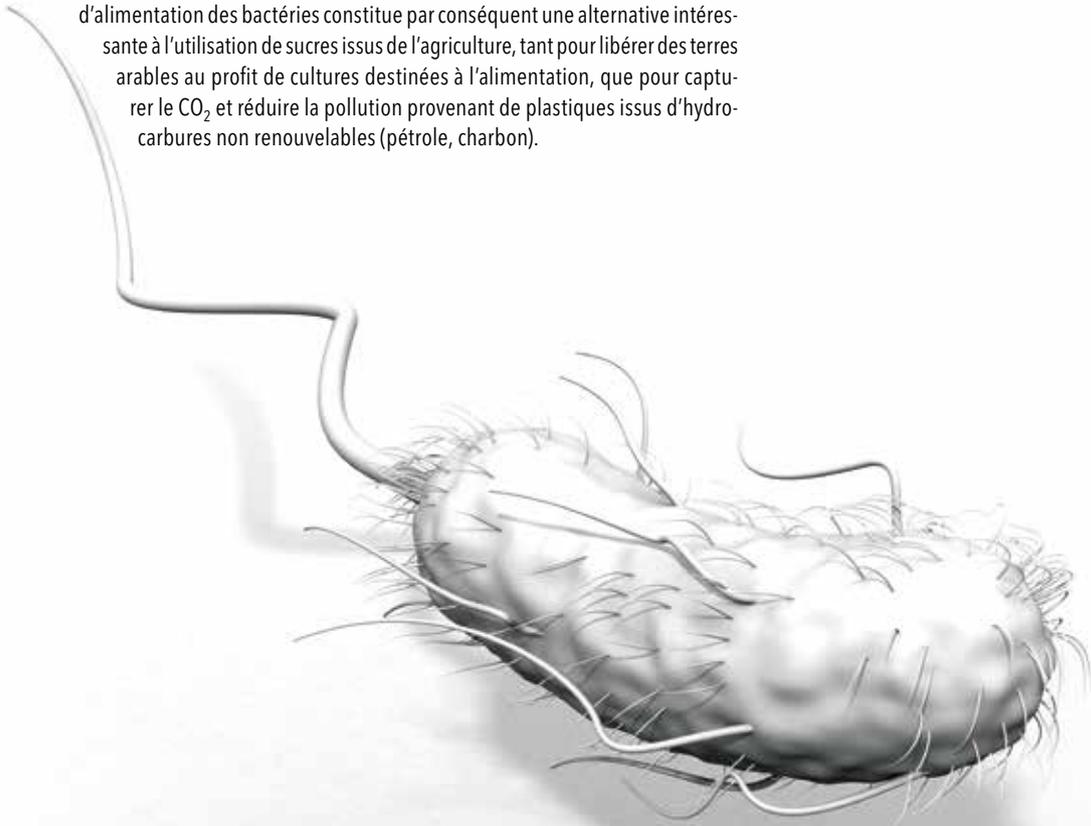


Stress biotiques/abiotiques : agressions provoquées par des organismes vivants (biotiques) ou des facteurs environnementaux (abiotiques) comme les variations de températures, l'humidité, des composés chimiques...



Micro-usine, maxi-effets

Dans notre course pour lutter contre le changement climatique, toute aide est la bienvenue. À leur échelle minuscule, même les bactéries peuvent y contribuer de façon très efficace, si on leur donne un petit coup de pouce. C'est l'objet des recherches entreprises par les scientifiques qui, grâce à l'ingénierie métabolique, peuvent doter des microorganismes de nouvelles fonctions. Ils sont alors capables de réaliser des tâches inédites pour eux. Les chercheurs ont ainsi modifié la bactérie *Escherichia coli* pour lui apprendre, d'une part à se nourrir de méthanol, et d'autre part à produire des monomères de plastiques biodégradables. Pourquoi du méthanol ? Ce composé organique très simple, obtenu par électrocatalyse du CO_2 présent dans l'atmosphère, permet de piéger de grandes quantités de CO_2 , qui est un gaz à effet de serre. En échange de cet « aliment », la bactérie produit les briques qui, une fois récupérées et assemblées, constitueront le bioplastique. Faire produire de nouveaux composés, à partir du carbone, à des bactéries n'est pas nouveau. La méthode est employée aussi bien pour la formulation de biocarburant que par l'industrie pharmaceutique, par exemple pour la production d'insuline. Cependant, ce carbone provient principalement de sucres issus de plantes cultivées dont la production prend la place de cultures qui pourraient être destinées à l'alimentation humaine ou animale. L'utilisation du méthanol comme nouvelle source d'alimentation des bactéries constitue par conséquent une alternative intéressante à l'utilisation de sucres issus de l'agriculture, tant pour libérer des terres arables au profit de cultures destinées à l'alimentation, que pour capturer le CO_2 et réduire la pollution provenant de plastiques issus d'hydrocarbures non renouvelables (pétrole, charbon).



© Adobe Stock



Nos amies les enzymes pour valoriser une biomasse récalcitrante

Enzymes gloutons

La nature pratique l'économie circulaire depuis toujours. Pour s'en convaincre, il suffit d'une balade en forêt. Les champignons y métabolisent le bois mort pour en extraire les nutriments, participant ainsi au recyclage de la matière organique. Les chercheurs s'inspirent de ces mécanismes complexes pour mettre au point des procédés biotechnologiques de dégradation des polysaccharides*. Sont notamment visées la cellulose (composant des parois cellulaires végétales) et la chitine (composant de la carapace des insectes et crustacés) qui comptent parmi les polymères les plus résistants. Rien d'étonnant puisque ce sont eux qui protègent les plantes et animaux contre de nombreux bioagresseurs. Présents en grandes quantités dans les coproduits du bois et de l'agriculture, ils recèlent des molécules qui intéressent non seulement l'industrie agroalimentaire et pharmaceutique mais aussi le secteur de l'énergie, notamment pour la formulation de biocarburants avancés et autres produits biosourcés. Les chercheurs s'attachent donc à identifier et mesurer l'efficacité des enzymes impliquées dans la dégradation de ces polysaccharides chez les champignons... et ce ne sont pas les candidats qui manquent ! Le Centre international de ressources microbiennes d'INRAE possède en effet une collection de 3 000 souches de champignons provenant du monde entier. Celles-ci constituent autant de réservoirs potentiels d'enzymes d'intérêt. À partir de cette collection unique, les chercheurs ont notamment récemment découvert de nouvelles enzymes oxydatives très performantes pour dégrader la cellulose et la chitine. Il s'agit maintenant d'intégrer ces biocatalyseurs* dans un bioprocédé respectueux de l'environnement et exploitable à l'échelle industrielle. Dans le cadre d'une démarche de bioéconomie, ces enzymes naturelles produites par les champignons pourraient être employées pour bien d'autres usages, par exemple la dégradation de polymères artificiels néfastes pour l'environnement.



© INRAE - S. Grisei



Biocatalyseurs: catalyseurs naturels tels que hormones, vitamines et enzymes, qui permettent la transformation de différents composés organiques.

Dispositif INRAE pour la bioéconomie

Nom: CIRM-CF (Centre international de ressources microbiennes – Champignons filamenteux)

Tutelles: INRAE, université Aix-Marseille

Démarrage: 2006

Lieu: INRAE Provence-Alpes-Côte d'Azur / Campus de Luminy, Marseille

Effectif: 4 agents INRAE et 1 enseignant-chercheur de l'université Aix-Marseille

Capacité: plus de 3 000 souches de champignons filamenteux

Objectifs: préserver et mettre à disposition de la communauté scientifique, académique ou industrielle, des souches de champignons filamenteux impliqués dans la transformation de la biomasse végétale pour des activités de recherche et développement dans des domaines variés (biotechnologies blanches, chimie verte, agro-industries...).

Le CIRM-CF est membre du Centre international de ressources microbiennes (CIRM), un réseau de 5 centres de ressources biologiques (CRB) fondé par INRAE en 2004. Tous certifiés ISO9001, ces CRB regroupent plus de 15 000 souches de microorganismes d'intérêt (bactéries, levures, champignons) pour la recherche agronomique et environnementale. Le CIRM appartient à RARE, une infrastructure nationale dédiée aux ressources agronomiques pour la recherche.

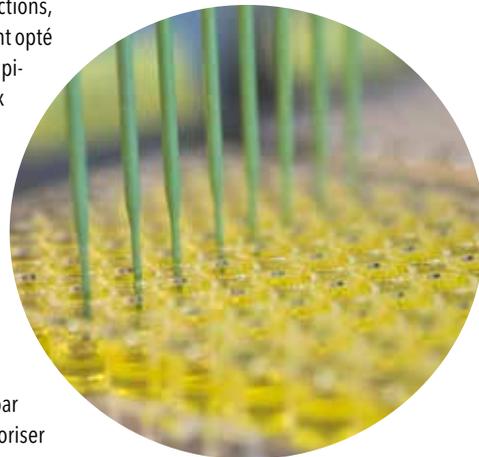
Outils: opérations de collecte en milieu naturel, rapatriement de collections (INRAE, établissements universitaires), dépôts sécurisés, identification moléculaire des souches, criblage d'activités enzymatiques, conservation des souches selon les recommandations de l'OCDE pour les CRB (3 modes différents dont la cryoconservation).

www.cirm-fungi.fr



Criblage express

Teck, robinier faux-acacia, ipé, maçaranduba... si ces bois sont employés pour habiller les terrasses, les abords des piscines ou les façades des maisons, c'est parce qu'ils font preuve d'une résistance hors norme aux agressions biotiques et abiotiques. Et ce n'est pas seulement en raison de leur extrême dureté. Ces essences produisent des molécules toxiques pour leurs agresseurs, qui persistent dans les fibres des planches de bois utilisées pour la construction. Pour identifier ces précieuses protections, qui intéressent le secteur de la cosmétique, la médecine ou l'agro-industrie, les scientifiques ont opté pour le biomimétisme en s'inspirant des modes d'action des champignons. En effet les champignons utilisent des enzymes pour éliminer les molécules protectrices qui freinent leur accès aux sucres contenus dans le bois, dont la cellulose. Chaque enzyme est spécifique de la molécule qu'elle cible. Après avoir étudié le fonctionnement de ces enzymes, les chercheurs ont mis au point un procédé technologique permettant de les employer en cocktails pour cribler les molécules présentes dans des extraits végétaux. Les chercheurs ont ainsi observé que celles qui interagissent avec ces enzymes possédaient souvent des propriétés antifongiques, mais aussi antioxydantes, insecticides ou herbicides, certaines cumulant plusieurs fonctions ! L'un des atouts de ce procédé enzymatique est sa rapidité. Il faut moins de 3 heures pour identifier l'ensemble des molécules d'intérêt à partir d'un extrait végétal, contre 3 ou 4 jours avec la méthode traditionnelle de culture des champignons. À l'issue du criblage, le dispositif dresse une cartographie des molécules d'intérêt de l'extrait, sous la forme d'un code-barre utilisable par les industriels. Une start-up, portée par deux chercheurs d'INRAE, est lancée en 2022 pour valoriser cette innovation technologique.



© INRAE - C. Maître

Née des résultats d'INRAE

Start-up issue des résultats d'INRAE: Oléoinnov

Création: 2019

Siège: Marseille (13)

Activités: mise au point de procédés durables, grâce notamment aux enzymes de certains champignons, pour valoriser les coproduits agricoles. Il s'agit de produire des molécules biosourcées à haute valeur ajoutée, à destination de nombreux secteurs :

- ▶ Production et commercialisation de solutions vertes contenant des biocatalyseurs comme alternative efficace, rentable et propre aux produits chimiques nocifs. Gamme pour la décoloration des toiles de jeans et pour la bioremédiation des effluents colorés.
- ▶ Production de molécules biosourcées aux propriétés antioxydantes, anti-inflammatoires et anticancérigènes à destination du secteur de la santé (technologie brevetée).
- ▶ Accompagnement pour les projets de recherche et développement pour la valorisation des coproduits agricoles.

oleoinnov.com



© Adobe Stock

Les étonnantes propriétés du robinier faux-acacia

Pourquoi emploie-t-on le robinier pour fabriquer les piquets des clôtures ? Tout simplement parce que la durabilité du bois de cet arbre originaire d'Amérique du Nord, aujourd'hui très répandu en France, est exceptionnelle. C'est en partie à la dihydrorobinétine qu'il doit cette formidable durabilité. Les scientifiques d'INRAE ont découvert que les composés extractibles du bois du robinier contiennent environ 40% de cette molécule dont les propriétés antimicrobiennes ont été démontrées. Alors pourquoi ne pas s'en servir comme biopesticide, pour protéger les plantes de culture ? Dans le cadre du projet WoodProActif (2020-2023), les chercheurs évaluent les effets d'un paillage « bioactif » constitué de broyat de robinier sur la vigne ainsi que sur 3 plantes modèles pour l'horticulture : la tomate, le cyclamen et l'oranger du Mexique. Comme la dihydrorobinétine est soluble, il suffit d'arroser le paillage pour qu'elle « percole » et se répande dans le sol. Si l'efficacité phytosanitaire est démontrée, tout comme l'absence de toxicité, ce procédé pourrait participer à la réduction d'intrants chimiques de synthèse pour la protection de certaines espèces végétales. Avec un avantage supplémentaire pour la planète : l'épandage de broyat permet une meilleure répartition et conservation du carbone accumulé par l'arbre au cours de sa vie, au contraire de la combustion. De plus, la molécule conviendrait à bien d'autres usages, par exemple dans la formulation de désinfectants de surface ou comme conservateur. Et ça n'est pas fini. Le bois de cœur du robinier contient aussi entre 5 et 10% de robinétine, une molécule aux propriétés de fluorescence ! Placez un objet taillé dans le bois de cœur sous une lumière noire, et il diffusera une intense lumière jaune. Et si l'on solubilise le pigment extrait dans un liquide, on obtient un colorant fluorescent pouvant servir d'encre sympathique. Une faculté susceptible d'intéresser les secteurs de la mode, de la publicité ou de l'événementiel, mais aussi l'industrie cosmétique.

Les lignines sortent du bois

L'industrie papetière et la production de bioéthanol génèrent chaque année plus de 50 millions de tonnes de lignines industrielles dans le monde. Or ces coproduits, susceptibles de contenir de nombreuses molécules d'intérêt, sont le plus souvent brûlés sur le site de production. Certes, leur combustion fournit de l'énergie, mais l'on pourrait faire tellement plus avec cette ressource d'origine végétale renouvelable. Dans le cadre du projet ZELCOR [1], une équipe pluridisciplinaire s'est attachée à convertir les lignines, mais aussi la cellulose récalcitrante qui lui est associée, et les humines* issues de la condensation des sucres, en ingrédients et matériaux à haute valeur ajoutée. Concrètement, ces coproduits ont été désassemblés, transformés et réassemblés, grâce à des méthodes respectueuses de l'environnement, et surtout par une approche en cascade, dans le but de valoriser de façon optimale l'ensemble des produits d'intérêt. Parmi les outils mis en œuvre figurent les enzymes, qui permettent de satisfaire plusieurs principes de la chimie verte. En explorant différentes populations microbiennes (bactéries, champignons et microbiotes d'insectes), 16 nouvelles enzymes capables de modifier les lignines et d'ajuster leurs propriétés ont été identifiées puis produites à différentes échelles par INRAE et l'université de Warwick (Royaume-Uni). Par exemple, l'une de ces enzymes permet de disperser dans l'eau des fractions de lignines solubles uniquement dans des solvants organiques polluants. D'autres permettent d'activer la lignine pour lui conférer des propriétés adhésives et assurer la cohésion de matériaux tels que les panneaux de particules. Mais c'est souvent grâce à leur combinaison en « cocktails » que les performances de ces biocatalyseurs peuvent réellement s'exprimer. À présent que les scientifiques ont démontré la faisabilité technique des procédés et la performance des outils, ce sont aux industriels qu'il incombe de se les approprier, pour développer une véritable industrie de la lignine et éviter le gaspillage de cette précieuse ressource.

[1] Stéphanie Baumberger, coordinatrice du projet ZELCOR, a remporté le prix spécial du jury lors de l'édition 2021 des Étoiles de l'Europe, qui récompense les coordinateurs de projets européens de recherche et d'innovation portés par une structure française.



© INRAE - C. Maître



Humines: matières organiques insolubles présentes dans les sols.

Des cocktails savamment dosés

Les bactéries sont des championnes du recyclage... Il suffit de jeter un œil à celles qui colonisent le tube digestif des termites. C'est en grande partie grâce à elles que ces insectes xylophages* parviennent à dégrader les composés lignocellulosiques présents aussi bien dans les branches humides que dans les

feuilles ou le bois dur et sec. Une belle source de bio-inspiration pour les chercheurs qui ambitionnent d'imiter, voire d'améliorer, ces formidables facultés, par exemple pour faciliter l'extraction de molécules d'intérêt présentes dans les coproduits de la biomasse végétale. Pour cela, ils utilisent la métagénomique fonctionnelle* qui permet de caractériser l'ensemble de l'ADN présent dans un échantillon, ici le tube digestif de l'insecte mais qui pourrait aussi être un champignon ou tout autre organisme xylophage. L'ADN est ensuite découpé en fragments qui contiennent chacun plusieurs gènes. Ces fragments d'ADN sont inclus dans des bactéries cultivées en laboratoire qui sont ensuite placées sur un substrat modèle composé de lignocellulose. Si les chercheurs constatent qu'une bactérie dégrade le substrat, cela signifie que le fragment d'ADN ajouté est porteur de l'activité enzymatique recherchée. Autrement dit, un des gènes contenus dans le fragment permet à la bactérie de fabriquer l'enzyme impliquée dans la dégradation. Les chercheurs s'attachent ensuite à identifier la façon dont ces enzymes coupent les polymères, leurs préférences, ou encore les différentes manières dont elles s'assemblent pour optimiser la dégradation de substrats infiniment variés dans leur composition. Ils peuvent ainsi expérimenter des synergies permettant de

démultiplier les propriétés de chaque enzyme. Ils développent par exemple des systèmes d'assemblage permettant d'interrompre la déconstruction des polymères à un stade précis de façon à récupérer spécifiquement certaines molécules. Si un industriel est intéressé par un type de composé bien particulier, les chercheurs formuleront un cocktail enzymatique capable de libérer ce composé en majorité. En outre, les scientifiques savent modifier ces enzymes pour les rendre capables de travailler à de plus hautes températures qu'elles ne le font naturellement, là encore pour faciliter leur emploi à l'échelle industrielle.



© Fotolia



Xylophage: qui se nourrit de bois.
Métagénomique fonctionnelle: technique qui permet d'identifier l'ensemble des gènes dominants présents dans un échantillon.



Accompagner l'innovation biotechnologique et le transfert de connaissances

De la recherche au développement

TWB (Toulouse white biotechnology) est un partenariat public-privé unique et original. Inaugurée en 2012, cette unité mixte de service opérant sous la triple tutelle INRAE, CNRS et INSA Toulouse fédère tous les acteurs, la recherche académique, les industriels, les investisseurs et les start-up, autour du développement et de l'accélération des applications des biotechnologies blanches*. Concrètement, TWB répond aux problématiques de la société et à celles des entreprises membres de son consortium, en élaborant des programmes de recherche et développement et en allouant les ressources nécessaires à leur mise en œuvre, soit en mobilisant ses propres experts et plateformes technologiques, soit en faisant appel à ses partenaires académiques. Cette initiative offre ainsi aux chercheurs l'opportunité d'aborder de nouvelles thématiques d'intérêt mais aussi, au travers d'applications concrètes, de prolonger la réflexion au-delà de la construction de connaissances. En plus de créer de la valeur ajoutée à la croisée des mondes académique et industriel, TWB héberge et accompagne des start-up en leur offrant un accès à l'ensemble des équipements technologiques disponibles en interne et chez ses partenaires et en leur attribuant, le cas échéant, les ressources humaines nécessaires au développement de leurs projets. Enfin, TWB finance chaque année des projets d'innovations de rupture susceptibles de déboucher sur de nouvelles briques technologiques. Les thématiques de recherche sont définies avec les industriels et donnent lieu à un appel à projet auprès des laboratoires académiques. Les membres du consortium bénéficient ensuite d'un droit de première négociation pour continuer le développement des résultats obtenus.



Biotechnologies blanches: technologies ayant pour objet la fabrication de produits (polymères, édulcorants, acides aminés, etc.), l'invention de procédés (bioraffinerie) ou la production de bioénergie à l'échelle industrielle à partir de l'utilisation de la biomasse, considérée comme une matière première renouvelable.



©TWB - J. Lortie

Dispositif INRAE pour la bioéconomie

Nom: TWB (Toulouse white biotechnology)

Tutelles: INRAE, INSA Toulouse, CNRS

Démarrage: 2012

Lieu: campus de l'INSA Toulouse

Effectif: 130 dont 30 personnels des start-up

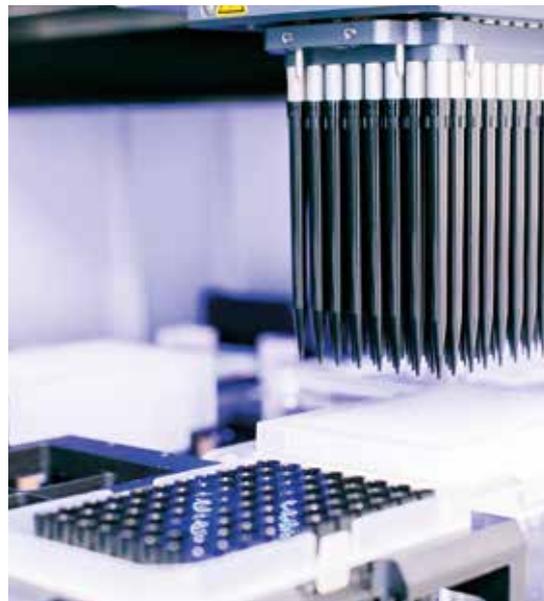
Objectifs: Infrastructure nationale d'excellence et expert dans la conduite de projets de R&D dans le domaine des biotechnologies industrielles, TWB accompagne les chercheurs, les entrepreneurs et les industriels pour développer de nouvelles filières de production sur la base de carbone renouvelable.

Outils:

- ▶ Sur la plateforme Ingénierie de souche, pour les projets de biologie synthétique et d'ingénierie génétique de microorganismes, des automates assurent la réalisation d'opérations unitaires: préparation d'acides nucléiques, station de clonage et transformation, piqueur de colonies automatisé, analyseurs d'acides nucléiques et protéines à haut débit.
- ▶ Sur la plateforme Bioprocédés (composée des services fermentation, analytique et cytométrie) pour le design et l'optimisation de procédés de culture microbienne: station de culture automatisée, miniréacteurs parallélisés et bioréacteurs de 50 mL à 300 L, parc de chromatographie liquide et gaz, spectrométrie de masse en ligne et hors ligne pour l'analyse des métabolites, dispositifs automatisés pour l'évolution naturelle de souches, analyses et tris cellulaires par cytométrie en flux.
- ▶ Hébergement et accompagnement de start-up pour accélérer leur développement technologique: mise à disposition de bureaux privatifs et de laboratoires propres, conseils scientifiques et stratégiques, support administratif et logistique, accès aux laboratoires et équipements technologiques de pointe, accès à l'écosystème TWB.
- ▶ Projets R&D menés en partenariat avec des industriels, des laboratoires et plateformes de pointe (TBI, CRITT bio-industries) et des infrastructures à échelle européenne.

Accélérer le transfert de connaissances en Europe

La biotechnologie est un des moteurs du développement de la bioéconomie pour les décennies à venir. Ce champ d'application utilise les systèmes vivants, notamment les microorganismes et leurs constituants moléculaires, pour transformer la biomasse en une immense variété de produits et services. Mais le développement de la biotechnologie nécessite des ressources importantes et la maîtrise de compétences extrêmement variées. Si elle apparaît comme l'une des clés du nouveau industriel, il est essentiel que l'Europe mobilise et concentre toutes ses compétences pour demeurer compétitive et assurer son indépendance. Le projet européen IBISBA, coordonné par INRAE, s'inscrit dans cette démarche. À la manière du constructeur Airbus, qui confie la fabrication des pièces des avions à des usines réparties dans plusieurs pays, IBISBA fédère et intègre les infrastructures de recherche européennes pour accompagner les projets de R&D ayant pour vocation la production de concepts biotechnologiques transférables au secteur industriel. Et ce ne sont pas les ressources qui manquent ! L'Europe est en effet pionnière dans le domaine des biotechnologies et, depuis Pasteur en France ou Koch en Allemagne, les centres de recherche européens n'ont cessé d'étudier le vivant, qu'il s'agisse de lutter contre les pathogènes, de favoriser les organismes bénéfiques ou d'inventer des moyens d'en exploiter le potentiel. Il est ainsi indispensable de mutualiser les expertises et les équipements pour subvenir aux demandes de R&D qui vont croître de façon exponentielle dans les prochaines années. Si les PME et start-up fourmillent d'idées nouvelles, ces acteurs ne disposent pas toujours des infrastructures pour les développer et les tester à une échelle préindustrielle. Renforcer le lien entre recherche, développement et production et ainsi accélérer le transfert vers l'industrie implique de faire entrer la biotechnologie dans l'industrie 4.0 en développant l'automatisation de procédés et en intégrant les nouvelles composantes de l'informatique (internet des objets, intelligence artificielle, cloud computing, etc.). L'exemple de Bisy est emblématique de cette démarche. Cette start-up autrichienne a en effet sollicité IBISBA pour réaliser la production, à une échelle préindustrielle, de molécules d'intérêt produites à partir de levures. Un centre de recherche à Barcelone a d'abord validé les résultats avant de tester avec succès le procédé à l'échelle d'une dizaine de litres. Les recherches ont ensuite été transférées vers une infrastructure finlandaise qui a poursuivi l'étude à une échelle supérieure, plus proche de l'échelle industrielle. Les résultats de l'étude ont permis de valider la technologie proposée par Bisy. Forte de ces résultats, la jeune pousse est parvenue à valoriser cette technologie auprès d'un investisseur. Bisy propose aujourd'hui différents services en biotechnologie et est spécialiste de la production de molécules d'intérêt pour différents secteurs à partir de levures.



©TMB - J.Lortic

Dispositif INRAE pour la bioéconomie

Nom: Carnot 3BCAR - Bioénergies, biomolécules et matériaux biosourcés du carbone renouvelable

Démarrage: 2011

Lieu: campus de l'INSA Toulouse

Effectif: 550 chercheurs et ingénieurs

Objectifs: Le Carnot 3BCAR, réseau de R&D porté par INRAE, propose une offre de compétences intégrée et multidisciplinaire en mobilisant les biotechnologies et la chimie verte pour l'innovation des entreprises dans les domaines des bioénergies, molécules et matériaux biosourcés. Les compétences rassemblées s'étendent de la production de biomasse, la bioraffinerie, jusqu'aux propriétés fonctionnelles.

Le label Carnot a vocation à développer la recherche partenariale, c'est-à-dire la conduite de travaux de recherche menés par des laboratoires publics en partenariat avec des acteurs socioéconomiques, principalement des entreprises (de la PME aux grands groupes), en réponse à leurs besoins.

Outils: 18 composantes réparties sur toute la France métropolitaine allant du laboratoire au pilote industriel proposant des compétences multidisciplinaires pour l'innovation des entreprises dans les domaines des bioénergies, des biomolécules et des matériaux biosourcés.

3bcar.fr



© Adobe Stock

03.



Filières décarbonées : comment accompagner la transition vers la bioéconomie

Dans le dictionnaire de la bioéconomie, on ne trouve pas le mot déchet. Toute la biomasse est valorisée, les coproduits étant appelés à remplacer les composés d'origine pétrochimique. Dans cette approche nouvelle d'une économie circulaire, rien ne se perd, tout se transforme. Et surtout, sont privilégiés les circuits courts et la proximité entre les centres de production et ceux de transformation de la biomasse, pour limiter le transport. La mise en place de ce nouveau modèle économique implique une connaissance exhaustive des ressources, ainsi qu'une analyse rigoureuse des impacts sociaux et environnementaux.



Des outils pour aider à développer la bioéconomie

À la poursuite du chanvre roui !

L'agriculteur vient de faucher sa culture de chanvre et les pailles ont été couchées au sol pour le rouissage. Durant 3 semaines environ, les microorganismes vont dégrader la matière, ce qui facilite la séparation ultérieure des fibres, situées à la périphérie de la tige, de la partie boisée centrale. Les fibres seront employées en papeterie ou dans l'élaboration de matériaux d'isolation pour le bâtiment, tandis que les autres parties de la plante le seront en plasturgie ainsi que dans l'industrie textile. La partie boisée, la chènevotte, servira de paillage ou de litière pour les animaux mais aussi de matériaux pour la fabrication de béton

isolant pour la construction. Ces applications ne seront possibles que si le rouissage s'est bien déroulé et que l'agriculteur a récolté la matière au bon moment. Trop tôt et le rouissage sera incomplet, trop tard et les fibres seront altérées avec pour conséquence, dans les deux situations, une diminution de la valeur marchande. Or aujourd'hui, l'agriculteur ne peut guère compter que sur son expérience pour déterminer le moment idéal pour la récolte. Afin de l'accompagner dans cette prise de décision, INRAE, l'université de Reims Champagne-Ardenne, l'université de Lille et la société FRD développent des méthodes et imaginent des dispositifs destinés à mesurer rapidement par analyse spectroscopique le niveau de rouissage du chanvre. Comme c'est d'abord sur la couleur de la paille que l'on juge du degré de rouissage, l'outil analyse le spectre de la lumière réfléchi par un échantillon. Ce spectre, de l'ultraviolet à l'infrarouge, porte en effet l'information chimique renseignant sur le processus de dégradation des tiges. Pour développer ces méthodes, les chercheurs ont longuement étudié le rouissage, tant en champs que dans les conditions contrôlées du laboratoire dans le cadre de projets d'envergure, à la fois scientifiques et techniques. Ils se sont aussi fortement appuyés sur l'expertise des agriculteurs, bien placés pour les ren-

seigner sur le processus de rouissage qui dépend tout autant de la lumière et des variations d'humidité et de température que de l'épaisseur du tas de paille ou de la composition des sols. En contrôlant l'évolution du spectre lumineux en cours de rouissage et en y associant les paramètres pédoclimatiques, l'agriculteur peut, grâce à cet outil, connaître en quelques minutes et avec une précision inédite le niveau de rouissage des pailles et ainsi s'approcher au plus près du rouissage optimal attendu par les industriels et les acteurs des filières des nouveaux produits agrosourcés.



© Adobe Stock

Les atouts des cartes

L'effort demandé est énorme. Pour répondre aux objectifs de la Stratégie nationale bas carbone, ce sont 12 millions de m³ de bois supplémentaires qui devront être prélevés d'ici 2026 dans les forêts de France métropolitaine. Certes, la ressource est immense (environ 2,6 milliards de m³ au total et 38,7 millions de m³ prélevés en 2018), mais elle est souvent difficile d'accès. Et de plus, sa composition est parfois méconnue. Dans le cadre du projet Protest (Prospective territoriale spatialisée), les chercheurs ont mis à profit des technologies innovantes pour cartographier l'ensemble du peuplement forestier d'un territoire, et en extraire des données d'intérêt à destination des gestionnaires publics et privés. Pour cela, ils ont notamment fait appel au Lidar aéroporté. Cet outil de télédétection, basé sur l'émission d'impulsions laser à très haute fréquence, génère un nuage de points qui reconstitue en 3D l'ensemble de la zone survolée. L'analyse de ces données permet de produire des cartes des forêts avec une résolution spatiale de 25 mètres (1 pixel correspond à un carré de 25 x 25 m) et une précision suffisante



© Adobe Stock



pour identifier la densité d'une parcelle, sa composition (feuillus, résineux), la taille moyenne des arbres (leur maturité) ainsi que son accessibilité par les moyens techniques (présence de voies de passage, déclivité du terrain...). En revanche, le Lidar ne détecte pas les plus jeunes arbres, qui renseignent sur la régénération et donc sur l'avenir du peuplement. L'expertise d'un forestier sur le terrain demeure par conséquent essentielle, afin d'évaluer le potentiel exploitable ou au contraire, pour confirmer la nécessité de mettre en place des mesures de sauvegarde. En effet, les algorithmes créés à partir des nuages de points et des relevés in situ permettent aussi d'identifier les zones d'habitats susceptibles d'abriter des espèces animales et végétales vulnérables, ou des forêts peu exploitées, mais qui présentent un intérêt pour la conservation de la biodiversité. Enfin, les données renseignent aussi sur les services écosystémiques des forêts, par exemple leur rôle, en montagne, dans la prévention des avalanches ou des chutes de pierres.

La base des bases

En bioéconomie, la notion de métabolisme associe l'analyse des flux de matières, de substances ou d'énergie, et l'analyse des acteurs qui les produisent, les transforment, les échangent (producteurs de biomasse d'origine agricole (BOA), entreprises impliquées dans leur transformation...). Le métabolisme s'intéresse aussi aux processus d'échanges de matières et d'énergie en jeu dans les sociétés humaines. Identifier les acteurs et comprendre le fonctionnement de ces flux est nécessaire pour référencer les filières existantes, déterminer leur dynamisme dans l'économie locale, mais aussi pour mesurer leur impact environnemental et socioéconomique. Des connaissances essentielles pour les chercheurs, enseignants, étudiants, mais

aussi pour les acteurs des territoires souhaitant développer des projets mobilisant de la BOA. Pour permettre un premier diagnostic de la production, transformation, consommation des BOA d'un territoire, de nombreuses bases de données existent (recensement agricole, registre parcellaire graphique, SIRENE, INAO, agence bio, etc.). Elles sont mises à jour régulièrement mais proviennent de sources différentes, hétérogènes, qui ne sont pas centralisées. SI-BOAT (Système d'information sur les biomasses d'origine agricole à l'échelle des territoires) a été conçu pour faciliter ces recherches. L'outil, qui agrège ces différentes bases de données, permet à l'utilisateur de

produire, pour son territoire, ce premier diagnostic sur son fonctionnement agricole, sur les acteurs en présence et de quantifier les productions et flux potentiels. Il permet, par exemple, d'identifier les ressources en paille, pour des réflexions territoriales sur la mise en place de filières de matériaux biosourcés. Ou d'identifier les types d'élevage et de culture pour repenser leurs liens à l'échelle des territoires et éventuellement les inclure dans des filières de matériaux ou de réutilisation des biodéchets, dans l'optique de bouclage local des cycles de matières. SI-BOAT est aujourd'hui en accès restreint, accessible à la demande pour des objectifs d'enseignement, de recherche et de production de connaissances sur les territoires.



700 millions de coproduits et moi, et moi...

L'Europe génère chaque année environ 700 millions de tonnes de coproduits d'origine agricole. Une ressource immense mais encore largement inexploitée, ou en tout cas, pas assez valorisée. Afin d'apporter un éclairage sur la transition depuis un modèle économique de production linéaire vers l'économie circulaire, les chercheurs ont mené une vaste étude auprès de 40 entreprises d'Europe et d'Asie impliquées dans la valorisation des coproduits, qui a permis d'identifier 5 facteurs de succès et de risques de ces initiatives. Il en ressort qu'il est important de bien évaluer l'équilibre entre les bénéfices d'exploiter les coproduits agricoles et les nuisances que cela peut apporter. Et surtout de bien prendre en compte les spécificités liées au coproduit qu'on envisage de valoriser et celles du territoire. Ces résultats peuvent être illustrés par des exemples concrets. Ainsi, une société qui souhaite récupérer les coproduits du raisin, pour en extraire des molécules d'intérêt à forte valeur ajoutée, doit mettre en place une chaîne couvrant l'approvisionnement et le stockage. Or l'activité étant saisonnière, et les exploitations viticoles réparties sur de grands territoires, les coûts logistiques peuvent s'avérer élevés, au regard des bénéfices attendus. De même, utiliser les déchets pour produire de l'énergie peut se heurter à une forte résistance des populations locales, en raison des risques de nuisances sonores et olfactives. Pourtant, elles profitent de ces aménagements, comme le montre cette initiative d'un agriculteur allemand dont le méthaniseur assure le chauffage du village où il est installé. Les aspects économiques et financiers sont un autre facteur important. Le développement et la production de biomatériaux coûte parfois plus cher que leurs équivalents issus des énergies fossiles, ce qui réserve leur usage aux domaines à très forte valeur ajoutée, telles que les cosmétiques, la santé ou la fabrication de composites. La réussite de telles entreprises suppose notamment de s'associer avec des acteurs locaux spécialisés dans les différentes étapes du processus, afin de mutualiser les coûts, optimiser les profits et limiter l'impact carbone lié au transport. Elle implique enfin la recherche de partenaires publics et privés, susceptibles d'accompagner et soutenir financièrement ces initiatives.



© Adobe Stock

Peau, paye et Olive

Tout le monde connaît les vertus de l'huile d'olive, pour l'alimentation et les cosmétiques. Ce qu'on ignore souvent en revanche, c'est que l'oléiculture génère de grandes quantités de sous-produits qui sont peu exploités. En Espagne ou en Italie toutefois, les volumes gigantesques et la grande taille des entreprises du secteur ont conduit à une organisation rationnelle de la filière. Des sociétés spécialisées dans la valorisation des déchets récupèrent les grignons (peaux, fragments de noyaux et des résidus de la pulpe), plus rarement les margines (liquides résultant du traitement des olives). Mais l'activité n'est pas toujours très rentable, d'autant que les coûts d'exploitation sont souvent élevés. Cependant, des initiatives voient le jour,

qui s'attachent à employer ces sous-produits pour des applications à forte valeur ajoutée, dans le cadre d'une économie circulaire. Ainsi, au Maroc, l'entreprise Aveo transforme la biomasse locale en énergie, pour alimenter des hôtels; en Espagne, Elayo

Group produit des aliments et des cosmétiques haut de gamme à base de graines d'olives, tandis qu'en France, la société Méditerranée environnement répand les noyaux concassés sur les pelouses artificielles des stades de foot, en remplacement des billes de caoutchouc. Vous l'ignoriez? Cela n'est pas étonnant: une étude, menée dans le cadre du projet COLIVE, montre que la majorité des entreprises qui s'impliquent dans ces activités communiquent peu sur la valorisation des sous-produits. Pourtant, ces initiatives sont plébiscitées par les consommateurs qui, de plus en plus, incluent les critères environnementaux et le cycle de vie des produits dans leurs processus d'achats.



© Adobe Stock



Mieux analyser l'impact environnemental et l'insertion dans les systèmes de production

Éclairer les débats autour de la bioéconomie territoriale

Et si la bioéconomie était avant tout une question de territoire ? L'ensemble des sujets abordés montrent la nécessité d'inventer des solutions pour réduire notre dépendance aux énergies fossiles et accroître la durabilité des sociétés humaines en limitant l'impact sur l'environnement. Mais à quelle échelle, sinon celle du territoire, mobiliser efficacement les acteurs concernés par la production, la transformation, le transport et le recyclage de la biomasse ? Et mettre en place des stratégies durables de développement qui tiennent compte des ressources disponibles, des spécificités biophysiques et du contexte socio-économique ? Évidemment, cela suppose de disposer de méthodes pour évaluer de façon précise et objective les impacts positifs et négatifs d'initiatives locales. C'est l'objet du projet BESTS, qui considère explicitement les interactions entre les différents systèmes de production, de transformation et de recyclage des biomasses agricoles et forestières dans un territoire. Les chercheurs expérimentent la plateforme de modélisation MAELIA qui permet de tester différents scénarios bioéconomiques et d'en mesurer l'impact environnemental, économique et social. Par exemple, les conséquences de l'installation d'un biométhaniseur intercommunal sur la fertilité des sols, la production alimentaire, le mix énergétique ou les émissions de CO₂. S'il s'agit pour le moment de produire de la connaissance, ce projet devrait permettre de fournir les bases pour le développement d'outils logiciels adaptés aux préoccupations des différents acteurs : entreprises, chambres d'agriculture, collectivités locales, bureaux d'étude... En décrivant de façon précise la composition d'un territoire, en estimant les impacts liés à l'exploitation d'une ressource ou la mise en place d'une politique locale, ils permettront d'objectiver les débats entre les parties prenantes. Et, peut-être, les inciter à se saisir davantage de ces questions de bioéconomie territoriale, sur le modèle de ce qui est discuté actuellement à l'île de La Réunion. Là-bas, les services de l'État, coopératives et syndicats interprofessionnels ont demandé explicitement la mise en place d'une gouvernance de la biomasse, de manière à organiser les usages en cascade depuis la production et la valorisation, jusqu'à son recyclage.

Dispositif INRAE pour la bioéconomie

Nom: MAELIA - Modelling of socio-agro-ecological system for landscape integrated assessment

Démarrage: 2010

Lieu: INRAE Grand Est-Colmar

Objectifs: MAELIA est une plateforme de modélisation et d'évaluation intégrées des territoires agricoles et systèmes de bioéconomie territoriale. Elle a pour objectif d'évaluer les impacts environnementaux, économiques et sociaux des changements combinés d'activités agricoles, de transformation et recyclage des biomasses, de modes de gestion des ressources naturelles (ex.: l'eau) et globaux (démographie, dynamique d'occupation du sol et changements climatiques).

Outils: architecture logicielle composée d'une base de données géoréférencées à haute résolution spatiale et d'une architecture multiagent intégrant une large gamme de modèles dynamiques couplés représentant des processus écologiques (ex.: croissance des plantes, hydrologie) et biotechniques (ex.: méthanisation) et des activités humaines (ex.: conduite des cultures, gestion des barrages) et leurs interactions.

maelia-platform.inra.fr

Née des résultats d'INRAE

Nom: Scanae

Création: 2015

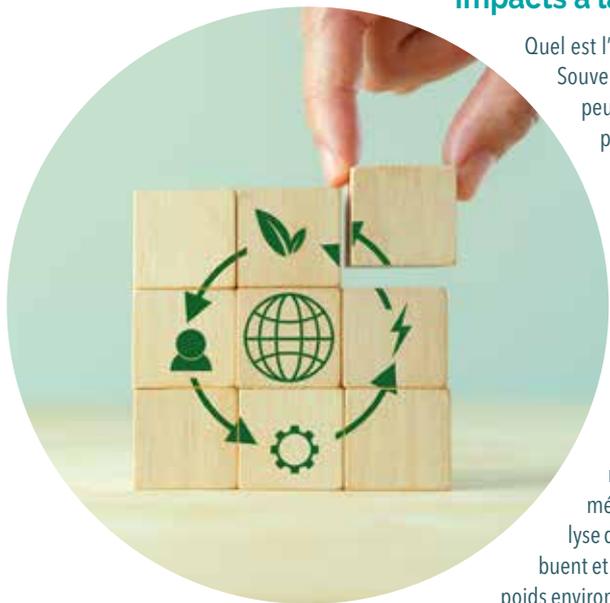
Siège: Grabels (34)

Activités: accompagnement des industriels pour réduire leur impact environnemental:

- › analyses de biodégradabilité des ingrédients et formulations;
- › analyse du potentiel de valorisation des déchets organiques;
- › accompagnement sur l'écoformulation des produits;
- › diagnostic et optimisation des bioprocédés.

www.scanae.com

Impacts à la chaîne



© Adobe Stock

[1] AGRIBALYSE : base de données environnementale de référence sur des produits agricoles et alimentaires agribalyse.ademe.fr

Quel est l'impact environnemental de la jolie carotte qu'aiment déguster les consommateurs ? Souvent on pense à l'eau, aux éventuels engrais et pesticides utilisés pour la faire pousser ; peut-être au diesel consommé par le tracteur qui l'a récoltée et les camions qui l'ont transportée jusqu'à l'étal du marché. Mais prend-on en compte l'ensemble des matériaux employés pour la fabrication de l'usine qui a fourni l'engrais ou le tracteur et, plus en amont encore, le poids environnemental de l'extraction des matières premières ? Répondre à une telle question est un immense défi qui requiert à la fois une méthodologie rigoureuse et une formidable quantité de données. C'est pour y parvenir que les chercheurs ont créé l'ACV, l'Analyse du cycle de vie, une méthode d'évaluation multicritère des impacts environnementaux d'un produit ou d'un système. À INRAE, ce sont en particulier les ressources (eau, espaces naturels, forêts, etc.), les produits (produits agricoles, procédés, aliments, déchets et produits résiduels, etc.) ou les systèmes (exploitation agricole, territoire, système alimentaire, système bioéconomique, etc.) qui sont ainsi analysés. Les chercheurs ne cessent d'élaborer de nouvelles méthodologies d'ACV qui tiennent compte des impacts récemment identifiés grâce à l'analyse des systèmes, depuis la production jusqu'à la fin de vie des produits. Pour cela, ils contribuent et s'appuient sur l'immense base de données AGRIBALYSE [1], qui permet de connaître le poids environnemental d'un produit alimentaire, depuis sa production agricole jusqu'à son achat ou sa préparation par le consommateur. Ils s'aident aussi de la plateforme MEANS qui regroupe de nombreux développements informatiques pour l'évaluation de la dimension environnementale des systèmes de production végétale, animale et de transformation des produits issus de l'agriculture. Tous ces outils permettent aux chercheurs de produire des évaluations à destination des scientifiques et des acteurs économiques et apportent des éléments pour répondre aux questions de société sur des thématiques variées, qu'il s'agisse des circuits courts, des biocarburants, de l'usage des territoires ou encore de la comparaison entre agriculture bio et conventionnelle.

Dispositif INRAE pour la bioéconomie

Nom : plateforme MEANS (MulticritEria AssessmeNt of Sustainability – Analyse multicritère de la durabilité)

Partenaire : Cirad

Démarrage : 2012

Lieu : INRAE Bretagne-Normandie

Objectifs : développement et mise à disposition de la communauté scientifique d'un ensemble complet et modulaire d'outils informatiques pour réaliser des analyses multicritères de la durabilité des systèmes de production végétale, animale et de transformation des produits agricoles.

Outils :

- ▶ 7 logiciels d'analyses multicritères de l'impact environnemental, social et économique sur différents systèmes de productions et de transformations végétales et animales ;
- ▶ mise en place et mutualisation de bases de données pour l'analyse multicritère ;
- ▶ développement d'un logiciel de référence dédié aux évaluations environnementales des produits agricoles et à leur transformation par Analyse du cycle de vie ;
- ▶ formation et accompagnement des utilisateurs.

www6.inrae.fr/means



Dispositif INRAE pour la bioéconomie

Nom : chaire industrielle ELSA-PACT

Partenaires :

- ▶ Partenaires académiques : Cirad, IMT Mines Alès, Institut Agro
- ▶ Partenaires privés : Bonduelle, BRL Groupe, Ecoflae, GRDF, SCP, Suez

Dates : 2019 -2023

Objectifs : promouvoir, diffuser et améliorer les méthodes ACV (Analyse du cycle de vie) dans les entreprises et auprès des acteurs publics pour accompagner les filières durables à une échelle territoriale, en particulier dans les domaines de la gestion de l'eau, de l'agriculture et l'agroalimentaire, des produits biosourcés, des produits résiduels organiques et des énergies renouvelables.

Outils :

- ▶ logiciels simplifiés pour opérationnaliser l'ACV ;
- ▶ guides pratiques, fiches techniques ;
- ▶ enseignement et formations.

www.elsa-pact.fr



Développer des filières à l'échelle régionale

Le Grand Est, berceau de vocations

Un collectif d'une rare ampleur s'est constitué autour des enjeux de la bioéconomie dans la région Grand Est. Dans le but de valoriser 3 ressources végétales importantes de la région (chanvre, houblon, oléagineux), un écosystème de recherche, d'enseignement et d'acteurs de ces filières s'est constitué pour travailler sur des concepts et schémas d'économie circulaire zéro déchet. Le projet 3BR (Biomolécules et biomatériaux pour la bioéconomie régionale), piloté par INRAE et les universités de Lorraine et de Reims Champagne-Ardenne, a ainsi fédéré la grande majorité des acteurs de la bioéconomie du Grand Est. Dans un souci de former les jeunes générations à la diversité des bioéconomies qui se développent dans les territoires et susciter de nouvelles vocations, plus de 40 étudiants en master ont été recrutés pour mener des travaux dans une grande variété de domaines, qu'il s'agisse de l'élaboration de matériaux biosourcés pour l'emballage, l'identification et la production de molécules innovantes, la valorisation des biodéchets en énergie ou fertilisants, l'amélioration des plantes, ou encore l'analyse socioéconomique de ces nouvelles approches. Inédite par son ampleur, cette mise en commun des structures, équipements et savoir-faire entre les acteurs publics et privés a permis de progresser significativement dans toutes les thématiques abordées. 3BR n'est toutefois que le début de l'histoire ! Des travaux de thèse sont issus directement des premières recherches menées et de nouveaux partenariats sont en construction, consolidant l'engagement des acteurs du territoire du Grand Est dans l'innovation pour une bioéconomie agricole et forestière soutenable.



@Adobe Stock

BETTER: bioéconomie pour les territoires urbains

Parce qu'il sera essentiel de pouvoir répondre demain aux enjeux de l'urbanisation croissante, le métaprogramme* BETTER, lancé en 2020, a pour ambition d'étudier en quoi le déploiement de la bioéconomie, au sein des villes et entre villes et campagnes, peut contribuer à rendre les villes plus durables. Il explore en particulier les évolutions socioéconomiques, organisationnelles, structurelles et technologiques qui peuvent amener les villes à réduire leurs déchets, à mieux les recycler et les valoriser, et à diminuer leur consommation directe et indirecte de carbone fossile. La perspective est triple :

- tendre vers le zéro émission nette de carbone à l'horizon 2050, objectifs que se sont fixés déjà un certain nombre de villes en France (dont Paris) et dans le monde ;
- contribuer aux **Objectifs du développement durable** des Nations unies d'ici 2030,
- et être plus résilientes face aux chocs et aux crises.

BETTER est centré sur les besoins et les contraintes des territoires urbains mais s'attache particulièrement aux défis que la transition bioéconomique des villes pose aux territoires alentours. Le métaprogramme s'intéresse ainsi à leurs aires d'approvisionnement et d'assimilation, certaines se situant dans leur périmètre périurbain, d'autres étant éloignées et fragmentées à l'échelle mondiale.



© Adobe Stock



Métaprogramme: dispositif original d'animation et de programmation scientifique propre à INRAE pour répondre aux défis scientifiques et sociétaux.

Quels usages pour la forêt de demain ?

La Stratégie nationale bas carbone* pour le climat vise une baisse de près de 54 % des émissions de GES dans le secteur du bâtiment d'ici 2030. Cet effort considérable implique de recourir massivement à l'écoconception et à remplacer les ressources fossiles par des matières premières renouvelables. Notamment par le bois qui, en plus d'être une ressource durable, et d'offrir de bonnes qualités mécaniques et thermiques, piège pour longtemps le carbone accumulé durant toute la vie de l'arbre. Cela tombe bien, la forêt française couvre 31 % du territoire, pour un total de 16,9 millions d'hectares. Ce n'est donc pas le bois qui manque. Ce qui fait cruellement défaut en revanche, ce sont les connaissances permettant de cerner les enjeux sociaux, économiques et politiques autour de la bioéconomie forestière, à l'aune des bouleversements à venir. Tant ceux liés au changement climatique qui va impacter la production, que ceux portant sur l'évolution des usages de la forêt, et ses conséquences pour les 3,3 millions de propriétaires. Créée en 2020 à Bordeaux, la chaire BioForTer (Bioéconomie, forêts et territoires) a pour mission de combler ces lacunes, en associant les scientifiques, les acteurs de la filière forêt-bois et les usagers, dans une démarche de réflexion participative et de coconstruction de projets autour de ces questions. Notamment à l'échelle du territoire, en abordant la circularité des ressources. En plus de produire de la connaissance et d'améliorer la transmission du savoir vers le monde professionnel et jusqu'au grand public, que ce soit par le biais de publications, webinaires ou via des outils d'aide à la décision, BioForTer nourrit aussi un objectif pédagogique. Il s'agit en effet de sensibiliser les futurs ingénieurs forêt-bois à ces enjeux, puisque ce sont eux qui auront la lourde tâche d'accompagner le changement des usages du bois, pour atteindre les objectifs de la Stratégie bas carbone.



© Adobe Stock



Stratégie nationale bas carbone: objectifs de réduction de 75% des GES d'ici 2050 (par rapport à 1990)
www.ecologie.gouv.fr/strategie-nationale-bas-carbone-snbc

L'heure des choix pour la filière bois



© Adobe Stock

Les forêts constituent l'un de nos meilleurs atouts dans notre course vers la neutralité carbone. Mais comment s'y prendre, pour optimiser au mieux ce potentiel ? C'est pour répondre à cette question que les chercheurs ont développé le modèle bioéconomique FFSM (French forest sector model).

Avec pour objectif principal de mieux comprendre comment la filière bois peut améliorer sa gestion face au changement climatique. L'outil permet notamment d'analyser et de comparer l'impact de deux leviers d'action. D'une part la séquestration du carbone en forêt – il s'agit alors de préserver, voire d'augmenter le volume de la biomasse –, de l'autre la substitution des produits fortement émetteurs de CO₂ par des matériaux issus de la filière bois. Par exemple pour la fourniture d'énergie renouvelable ou pour la construction, en remplacement du béton. Dans le premier cas, le modèle peut intégrer les effets du changement climatique sur la ressource. Les tempêtes et sécheresses, le développement des espèces invasives comme les scolytes imposent une adaptation des forêts à long terme, qui doit être envisagée dès maintenant, si l'on souhaite qu'elles maintiennent leur fonction de puits de carbone. Dans le second cas, le modèle permet de tester différents scénarios prenant en compte les freins et leviers socioéconomiques. Par exemple, la filière bois souffre d'un déficit commercial, dû notamment au fait que l'on exporte les grumes (les troncs d'arbre) pour importer les produits transformés, à la valeur ajoutée supérieure. Ainsi, l'impact en termes d'émissions de GES est remarquable. Grâce à FFSM, les économistes peuvent tester les conséquences de la mise en place d'une taxe carbone sur les flux des matériaux. Dans ce cas, le modèle montre qu'une telle mesure engendre une légère hausse de la production de la filière bois au niveau national, mais des disparités au niveau régional : avec

une relocalisation de la production, les régions importatrices connaissent un déficit de matière première. Autre enseignement de FFSM, l'impact de la séquestration du carbone en forêt apparaît plus efficace que la substitution, en matière de bilan climatique. Mais à court terme seulement, car si l'on observe les effets au-delà de trois décennies, la tendance s'inverse. Notamment parce que le puits de carbone forestier pourra avoir tendance à saturer à un horizon aussi long, et également par la nature cumulative des effets de substitution : les quantités consommées chaque année permettent d'éviter des émissions provenant de produits plus intenses en carbone.



Jardin créole 2.0

L'agriculture climato-intelligente a pour objectif d'augmenter la production alimentaire tout en l'adaptant aux changements climatiques et en réduisant les émissions de gaz à effet de serre. Ce concept théorisé par la FAO apparaît extrêmement ambitieux, mais il reflète l'urgence de la situation. Alors pourquoi ne pas tenter de le mettre en pratique, dans une démarche scientifique ? C'est tout l'objet du projet de microferme KARUSMART expérimenté par INRAE en Guadeloupe. Dans cette exploitation en agriculture biologique de seulement 1 hectare, la canne à sucre et les bananes jouxtent la zone de maraîchage et la prairie où s'ébattent quelques animaux d'élevage. L'organisation reprend le principe du jardin créole traditionnel, basé sur la diversification des cultures et la valorisation des biomasses résiduelles. Mais organisé de façon extrêmement rigoureuse, pour exploiter le moindre mètre carré et optimiser les rendements. Ici, les déchets sont recyclés sous forme de bio-intrants et participent ainsi à la séquestration du carbone. Les chercheurs expérimentent aussi le recyclage des bagasses, les résidus de la canne à sucre, qui révèlent des ressources insoupçonnées : répandues dans la zone maraîchère, elles limitent le développement des adventices, protègent le sol en cas de fortes pluies et maintiennent l'humidité durant la sécheresse. Des cocktails naturels biostimulants pour les plantes, hérités de l'agriculture traditionnelle des Antilles, sont aussi testés. Résultat, 3 ans après sa mise en place, la microferme affiche des rendements égaux ou supérieurs aux moyennes régionales. Au point que 1 500 m² suffisent à nourrir une personne, contre 4 000 m² en moyenne en Europe. La contrepartie, c'est que la gestion impose une charge de travail très importante et de solides connaissances techniques. Mais les revenus peuvent alors s'élever à 24 000 euros brut par an et par hectare. Ainsi, une microferme de 2 hectares permet de subvenir aux besoins d'un couple d'agriculteurs, tout en assurant une production couvrant les besoins de 12 personnes environ. Les modèles montrent que 30 000 microfermes réparties sur le territoire permettraient d'assurer l'autonomie alimentaire de la Guadeloupe. Mais pour parvenir à cet idéal, l'île devrait compter 6 fois plus d'agriculteurs qu'aujourd'hui. Pour accompagner cet effort gigantesque qui implique un changement radical de la politique agricole, les chercheurs construisent des modèles d'aide à la décision qui évaluent de manière quantitative les avantages des microfermes pour l'économie et l'environnement, mais aussi les contraintes, tout en proposant des leviers pour leur développement.





Glossaire

Acide gras hydroxylé : composés d'origine naturelle disponibles dans la plupart des êtres vivants, jouant un rôle essentiel dans le métabolisme, notamment pour le maintien de la membrane ou d'autres structures cellulaires.

Antifouling : peinture destinée à empêcher les organismes marins de se fixer sur la coque des navires ou de tout autre matériau immergé.

Biocatalyseurs : catalyseurs naturels tels que hormones, vitamines et enzymes, qui permettent la transformation de différents composés organiques.

Biocontrôle : ensemble des méthodes de protection des végétaux qui utilisent des organismes vivants ou substances naturelles pour prévenir ou réduire les dommages causés par des organismes nuisibles (ravageurs, plantes adventices et pathogènes).

Biomasse lignocellulosique : constituant principal de la paroi cellulaire des plantes. Elle est la source de carbone renouvelable la plus abondante de la planète. Elle est constituée de trois éléments majeurs qui sont la cellulose, l'hémicellulose et la lignine.

Biomimétisme : processus d'innovation et d'ingénierie qui s'inspire des formes, des matières, des propriétés, des processus et des fonctions du vivant.

Biostimulation : utilisation de substances inertes ou des microorganismes dont l'objectif est d'améliorer le fonctionnement de la plante, du sol ou les interactions entre sol et plante.

Biotechnologies blanches : technologies ayant pour objet la fabrication de produits (polymères, édulcorants, acides aminés, etc.), l'invention de procédés (bioraffinerie) ou la production de bioénergie à l'échelle industrielle à partir de l'utilisation de la biomasse, considérée comme une matière première renouvelable.

Cambium : tissu cellulaire des tiges et des racines qui donne naissance au bois, au liège.

Cellulose : matière contenue dans la paroi des cellules végétales, notamment utilisée dans la fabrication de papier et de textiles.

Coproduits de l'industrie : produit annexe d'un processus industriel, dont la fabrication n'est pas directement recherchée, mais qui peut être valorisé économiquement.

Duramen : partie interne du bois, correspondant aux zones d'accroissement les plus anciennement formées, qui ne comportent plus de cellules vivantes.

Exsudat : substances organiques complexes, plus ou moins fluides, qui suintent de certaines espèces de plantes, généralement des arbres, dont l'objectif est de cicatrifier la blessure.

Humines : matières organiques insolubles présentes dans les sols telles que l'humus.

Matériau composite : assemblage d'au moins deux composants différents non miscibles dont les propriétés se complètent.

Métagénomique fonctionnelle : technique qui permet d'identifier l'ensemble des gènes dominants présents dans un échantillon.

Métaprogramme : dispositif original d'animation et de programmation scientifique propre à INRAE pour répondre aux défis scientifiques et sociétaux.

Monomère : composé constitué de molécules simples, et capable de former des polymères.

Mulch horticole : couche de matériau protecteur (copeaux, pailles, écorces...) posée sur le sol. Elle a plusieurs fonctions : contrôler la levée des

adventices, protéger le sol contre les intempéries et l'érosion, préserver l'humidité et l'azote du sol...

Plante triploïde : plantes possédant 3 paires de chromosomes au lieu des 2 habituellement.

Polymère : macromolécules qui sont formées par un enchaînement de petites molécules (par exemple l'amidon est un polymère constitué de molécules de glucose).

Polysaccharides : molécules complexes faisant partie de la famille des glucides et constituées d'un grand nombre de monomères de sucres. La cellulose et l'amidon sont des polysaccharides.

Résidu de l'agriculture : parties aériennes des végétaux non récoltées et laissées sur le sol dans les champs ou les vergers au moment de la récolte : les tiges et les chaumes, les feuilles et les gousses par exemple.

Rhizome : tige souterraine remplie de réserve alimentaire de certaines plantes vivaces qui porte les racines et les tiges aériennes.

Rouissage : macération que l'on fait subir aux plantes textiles telles que le lin ou le chanvre pour faciliter la séparation de l'écorce filamenteuse avec la tige.

Stress biotiques/abiotiques : agressions provoquées par des organismes vivants (biotiques) ou des facteurs environnementaux (abiotiques) comme les variations de températures, l'humidité, des composés chimiques...

Trophée les Étoiles de l'Europe : il récompense chaque année 12 lauréats pour leur engagement européen et leur travail de coordination de projets de recherche au service d'enjeux sociétaux majeurs.

Xylophage : qui se nourrit de bois.



Contacts scientifiques

Coordinatrice scientifique

Monique Axelos / monique.axelos@inrae.fr

Directrice scientifique Alimentation et Bioéconomie

01. La biomasse, une diversité de ressources

Les richesses insoupçonnées du bois / La gemme, naturelle par essence

Francis Colin / francis.colin@inrae.fr

UMR FARE / Dpt ECODIV / INRAE Grand Est-Nancy

Le miscanthus : une plante durable à fort potentiel

Hermanus Höfte / hermanue.hofte@inrae.fr

UMR IJPB / Dpt BAP / INRAE Île-de-France-Versailles-Saclay

Les multiples usages des os

Vincenza Ferraro / vincenza.ferraro@inrae.fr

UR QuaPA / Dpt TRANSFORM /
INRAE Clermont-Auvergne-Rhône-Alpes

Dans le lin, tout est bien

Johnny Beaugrand / johnny.beaugrand@inrae.fr

UR BIA / Dpt TRANSFORM / INRAE Pays de la Loire

Le tournesol du sol au plafond

Jean-Denis Mathias / jean-denis.mathias@inrae.fr

UR LISC / Dpt MATHNUM /
INRAE Clermont-Auvergne-Rhône-Alpes

Les bioplastiques, ça nous emballer !

Nathalie Gontard / nathalie.gontard@inrae.fr

UMR IATE / Dpt TRANSFORM / INRAE Occitanie-Montpellier

Un biocide au cœur vert

Isabelle Capron / isabelle.capron@inrae.fr

UR BIA / Dpt TRANSFORM / INRAE Pays de la Loire

Du caoutchouc en peau de tomate

Bénédicte Bakan / benedicte.bakan@inrae.fr

UR BIA / Dpt TRANSFORM / INRAE Pays de la Loire

02. Les trésors qui se cachent dans la biomasse

Cent molécules, d'une seule traite

Christophe Robin / christophe.robin@inrae.fr

UMR LAE / Dpt AGROECOSYSTEM / INRAE Grand Est-Nancy

Les termites, des insectes pleins de ressources / Les lignines sortent du bois

Stéphanie Baumberger / stephanie.baumberger@inrae.fr

UMR IJPB / Dpt BAP / INRAE Île-de-France-Versailles-Saclay

De l'huile sur mesure grâce à la cameline

Jean-Denis Faure / jean-denis.faure@inrae.fr

UMR IJPB / Dpt BAP / INRAE Île-de-France-Versailles-Saclay

Micro-usine, maxi-effets

Stéphanie Heux / stephanie.heux@inrae.fr

UMR TBI / Dpt MICA / INRAE Occitanie-Toulouse

Enzymes glutines

Jean-Guy Berrin / jean-guy.berrin@inrae.fr

UMR BBF / Dpts TRANSFORM et MICA /
INRAE Provence-Alpes-Côte d'Azur

Criblage express

Éric Gelhaye / eric.gelhaye@inrae.fr

UMR IAM / Dpt ECODIV / INRAE Grand Est-Nancy

Les étonnantes propriétés du robinier faux-acacia

Christian Breton / christian.breton@inrae.fr

UMR BIOFORA / Dpt ECODIV / INRAE Val de Loire

Des cocktails savamment dosés

Claire Dumon / claire.dumon@inrae.fr

Cédric Montanier / cedric.montanier@inrae.fr

UMR TBI / Dpts TRANSFORM et MICA /
INRAE Occitanie-Toulouse

De la recherche au développement

Olivier Rolland / olivier.rolland@inrae.fr

UMS TWB / Dpts TRANSFORM et MICA /
INRAE Occitanie-Toulouse

Accélérer le transfert de connaissances en Europe

Michael O'Donohue / michael.odonohue@inrae.fr

Dpt TRANSFORM / INRAE Occitanie-Toulouse

03. Filières décarbonées : comment accompagner la transition vers la bioéconomie ?

À la poursuite du chanvre roui ! / Le Grand Est, berceau de vocations

Bernard Kurek / bernard.kurek@inrae.fr

UMR FARE / Dpt TRANSFORM / INRAE Grand Est-Nancy

Les atouts des cartes

Jean-Mathieu Monnet / jean-mathieu.monnet@inrae.fr

UR LESSEM / Dpt ACT /
INRAE Lyon-Grenoble-Auvergne-Rhône-Alpes

La base des bases

Myriam Grillot / myriam.grillot@inrae.fr

UMR AGIR / Dpt ACT / INRAE Occitanie-Toulouse

700 millions de coproduits et moi, et moi... / Peau, paye et Olive

Mechthild Donner / mechthild.donner@inrae.fr

UMR MOISA / Dpt ECOSOCIO / INRAE Occitanie-Montpellier

Éclairer les débats autour de la bioéconomie territoriale

Olivier Théron / olivier.therond@inrae.fr

Julie Wohlfahrt / julie.wohlfahrt@inrae.fr

UR LAE / Dpt AGROECOSYSTEM / INRAE Grand Est-Colmar

Impacts à la chaîne

Arnaud Hélias / arnaud.helias@inrae.fr

UMR ITAP / Dpts AGROECOSYSTEM et MATHNUM /
INRAE Occitanie-Montpellier

Hayo Van der Werf / hayo.van-der-werf@inrae.fr

UMR SAS / Dpt AGROECOSYSTEM /
INRAE Bretagne-Normandie

Quels usages pour les forêts de demain ?

Arnaud Sergent / arnaud.sergent@inrae.fr

UR ETTIS / Dpt ECOSOCIO /
INRAE Nouvelle-Aquitaine-Bordeaux

L'heure des choix pour la filière bois

Philippe Delacote / philippe.delacote@inrae.fr

UMR BETA / Dpt ECOSOCIO / INRAE Grand Est-Nancy

Jardin créole 2.0

Jean-Marc Blazy / jean-marc.blazy@inrae.fr

UMR ASTRO / Dpts ECOSOCIO et AGROECOSYSTEM /
INRAE Antilles-Guyane



Dpt / Département scientifique
UMR / Unité mixte de recherche
UMS / Unité mixte de service
UR / Unité de recherche



Centre-siège Paris-Antony
Service Presse
Tél. : +33 (0)1 42 75 91 86
presse@inrae.fr

Rejoignez-nous sur :



[inrae.fr/presse](https://www.inrae.fr/presse)

**Institut national de recherche pour
l'agriculture, l'alimentation et l'environnement**



**RÉPUBLIQUE
FRANÇAISE**

*Liberté
Égalité
Fraternité*

INRAE