



**HAL**  
open science

## **Le biosourcé va-t-il verdir le bâtiment**

Michael O'Donohue, Monique Axelos, Sarah-Louise Filleux, Chavance Yann,  
Lerayer Pierre-Yves, Aigue Véronique, Johnny Beaugrand, Helene Fulcrand,  
Philippe Gerardin, Jean-Denis Mathias, et al.

► **To cite this version:**

Michael O'Donohue, Monique Axelos, Sarah-Louise Filleux, Chavance Yann, Lerayer Pierre-Yves, et al.. Le biosourcé va-t-il verdir le bâtiment. "Ressources" n°3, la revue INRAE, 3, pp.66-85, 2023, 10.17180/T5CZ-WM26 . hal-03959362

**HAL Id: hal-03959362**

**<https://hal.inrae.fr/hal-03959362>**

Submitted on 31 Jan 2023

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Copyright

# LE BIOSOURCÉ VA-T-IL VERDIR LE BÂTIMENT ?

La biomasse semble un remède miracle pour réduire nos émissions de gaz à effet de serre et atténuer le changement climatique, particulièrement pour le secteur du bâtiment, responsable de près d'un quart des émissions en France. Construire en bois, paille, tournesol, chanvre répond-il à toutes les questions ?

Ce dossier aborde essentiellement l'utilisation des matériaux biosourcés autres que le bois d'œuvre qui n'est ici qu'évoqué.

# LA PROMESSE DES MATÉRIAUX BIOSOURCÉS

Responsable de 37%<sup>1</sup> des émissions de CO<sub>2</sub> mondiales en 2021, selon l'ONU, le secteur du bâtiment est l'un des plus énergivores et polluants. Face aux défis environnementaux qui s'imposent, les matériaux biosourcés pourraient représenter une piste prometteuse de réduction de l'empreinte environnementale du secteur.

## Explications.

Extraction et transformation de matériaux, construction intensive, mauvaises performances énergétiques... le secteur du bâtiment (lire ci-contre) est source de pollutions. Selon le ministère de la Transition écologique et de la Cohésion des territoires<sup>2</sup>, il « représente 43% des consommations énergétiques annuelles et génère 23% des émissions de gaz à effet de serre en France ». Des consommations en grande partie liées aux phases de construction et de démolition, qui représentent entre 60 et 90% de l'impact carbone total pour un bâtiment ayant une durée de vie de 50 ans. Et c'est « sans compter les impacts d'extraction, de transport et de transformation », ajoute Laurent Arnaud, directeur du département Bâtiments durables au Centre d'études et d'expertise sur les risques, l'environnement, la mobilité et l'aménagement (Cerema). À elle seule, la production de ciment émet près d'un milliard de tonnes de CO<sub>2</sub>, dues au transport de l'argile et de calcaire sur des milliers de kilomètres, ainsi qu'à la chauffe à 1450 °C.

### Commencer par la construction

En France, la réglementation en matière d'environnement voit le jour en 1974. Ces normes dites

#### BTP / BÂTIMENT

Le secteur du bâtiment regroupe tous travaux de construction, aménagement, rénovation et démolition d'espace habitables (logements, bureaux, hôpitaux...).

Il n'englobe pas le développement des infrastructures comme les tunnels, les routes, les ponts... dénommés travaux public.

L'ensemble forme le BTP.

thermiques (RT) visent à limiter les dépenses énergétiques une fois le bâtiment habité (chauffage, climatisation, eau chaude et éclairage). Depuis le 1<sup>er</sup> janvier 2022, la dernière est remplacée par une réglementation environnementale (RE 2020), qui inclut désormais les émissions de carbone liées à la phase de construction du bâtiment en s'appuyant sur l'analyse du cycle de vie (ACV) des matériaux<sup>3</sup>. Elle incite donc fortement les constructeurs à opter pour des matériaux peu émetteurs. Les bétons de chanvre sont, par exemple, une alternative intéressante au béton conventionnel, à condition d'utiliser un autre liant que le ciment, comme la chaux ou la terre crue. Cette norme est une des étapes du gouvernement français pour atteindre les objectifs de transition environnementale du Plan climat<sup>4</sup> et la neutralité carbone d'ici à 2050.

### Les matériaux biosourcés, une piste prometteuse

La stratégie du gouvernement est triple pour le bâti : « baisser les consommations d'énergie des bâtiments, réduire les coûts liés à la facture d'énergie et réduire l'empreinte carbone des bâtiments existants et à venir ». →



## RE 2020 Des biomatériaux multiperformants

Les biomatériaux ne seront peut-être pas les plus adaptés à la réalisation d'ouvrages d'art comme les ponts ou les barrages, dont la première qualité attendue est la robustesse. Mais leur légèreté et leur souplesse offrent des caractéristiques techniques suffisantes pour les bâtiments moins exigeants, comme les bureaux ou les logements. Et surtout, ils possèdent d'autres qualités précieuses, grâce à leur structure poreuse. « *En absorbant la vapeur d'eau de l'air, les matériaux issus du végétal, très poreux, vont servir de réservoir pour réguler la température du bâtiment en été* », explique Laurent Arnaud, qui assure pouvoir trouver des végétaux adaptés dans chaque région de France. On parle de déphasage

thermique. La chaleur extérieure met un temps important pour traverser les parois et pénétrer dans le bâtiment. Les matériaux répondent donc plus facilement à la réglementation environnementale 2020 (RE 2020 en vigueur), qui exige une température interne ne dépassant pas les 25 °C dans les logements, même en cas de canicule. En hiver, cette porosité – liée aux anciens vaisseaux conducteurs de sève de ces matériaux – leur procure d'excellentes performances isolantes. « *Une laine d'isolation, c'est entre 80 % et 90 % d'air. Donc on vend de l'air, mais de l'air qui isole bien les bâtiments* », conclut Laurent Arnaud. Les fibres végétales et leurs structures alvéolées offrent aussi des propriétés antibruit bien supérieures aux équivalents conventionnels, ce qui permet d'avoir un matériau « 2 en 1 », isolant thermique et phonique. Enfin, lorsqu'ils sont bien conçus, les produits biosourcés, contrairement au béton classique et

aux isolants minéraux, se recyclent. Ils pourraient même être épandus au champ. Un bâtiment biosourcé en fin de vie générera ainsi très peu de déchets ultimes, quand le secteur produit actuellement 46 millions de tonnes de déchets par an en France. Si ces matériaux sont « durables » sur le plan écologique, sont-ils résistants dans le temps ? Pour comprendre la dégradation à long terme des fibres végétales, un consortium de scientifiques, auquel a participé INRAE, a étudié les fibres de lin de tableaux d'art du XVII<sup>e</sup> siècle et de linges mortuaires égyptiens datant de 4 000 ans. Les résultats montrent\*, qu'en dépit de l'âge, ce sont les changements environnementaux (température, humidité, UV) et certains traitements de conservation qui ont endommagé les fibres. Des éléments à prendre en compte dès la conception ou lors de l'application des matériaux biosourcés.

\* [url.inrae.fr/3clspMI](http://url.inrae.fr/3clspMI)

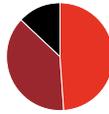
Cette réglementation entend bien inciter à « *un recours plus fréquent au bois et aux matériaux biosourcés, qui stockent le carbone pendant la durée de vie du bâtiment* ». Issus du monde du vivant et utilisés comme matériaux de construction, les produits biosourcés autres que le bois d'œuvre se présentent sous forme de fibres pour la fabrication de laines d'isolation ou sous forme de granules pour la constitution de mortiers. Ils peuvent être issus du bois, du chanvre, du liège, du lin, etc. Objets d'étude depuis plus de 15 ans pour les équipes INRAE, « *ces matériaux, surtout les fibres qui les composent, viennent en substitution aux matériaux pétrosourcés* », explique Monique Axelos, directrice scientifique Alimentation et Bioéconomie d'INRAE, « *mais ils apportent aussi des qualités qui leur sont propres comme la légèreté et la résistance (lire page 69) et contribuent ainsi à une économie durable et circulaire et au développement des territoires* ». Ils présentent un énorme potentiel pour le secteur du bâtiment, puisque leur ACV démontre une baisse drastique des émissions de gaz à effet de serre (GES) liées à l'extraction et à la production. De surcroît, ils permettent d'en stocker : « *Pour un mur de 1 m<sup>2</sup> et de 30 cm d'épaisseur en béton de chanvre, 32 kg de CO<sub>2</sub> sont stockés sur l'ensemble de la vie du produit* », précise par exemple Laurent Arnaud. Autre intérêt de ce type de matériaux : valoriser des déchets qui ne l'étaient jusqu'alors que très peu, comme les pailles ou les bales de céréales (la peau qui enrobe la graine), pour un coût moindre et une meilleure accessibilité sur l'ensemble du territoire.

### Une progression à accompagner

La solution semble accessible, mais d'après Philippe Léonardon, ingénieur au service bâtiment de l'Ademe, « *seuls 10 % des isolants mis sur le marché en France sont pour le moment issus du vivant*. » Impulser le mouvement « *n'est qu'une question de volonté politique* » car « *les connaissances techniques sont existantes et suffisantes* ». En effet, la RE 2020 « *n'impose rien quant à l'usage des matériaux biosourcés* », ajoute l'ingénieur. Pour lui, les biomatériaux ne sont, dans le texte réglementaire, qu'indirectement favorisés par le biais de calculs savants : « *chaque produit de construction, chaque équipement et chaque service (énergie, carbone, eau) est caractérisé par un objectif environnemental* ». Au total, 27 indicateurs (potentiel de réchauffement climatique, consom-

### LE BÂTIMENT EN FRANCE

**46 M**  
de tonnes de déchet par an (soit 19 % des déchets du secteur du BTP) dont :



● 49 % par les démolitions

● 38 % lors des réhabilitations

● 13 % liés aux constructions neuves

**25 %**  
des émissions de GES de France sont réalisés par les bâtiments résidentiels et tertiaires

**70 %**  
des émissions de GES d'un bâtiment sont dues à l'impact de ses matériaux de construction et de ses équipements techniques

**51 M**  
de tonnes de matériaux sont utilisés en 2015 pour construire des bâtiments résidentiels et tertiaires

Source Ademe : [url.inrae.fr/3zF7Qqx](http://url.inrae.fr/3zF7Qqx)

mation d'eau douce, rejet de déchet radioactif, etc.) déterminent un chiffre global d'émission de GES. « *Sans être expressément nommés, les matériaux biosourcés permettent d'atteindre les objectifs fixés.* »

La France, premier producteur de chanvre en Europe, peut miser sur cette plante pour développer la filière des matériaux biosourcés à destination du bâtiment, mais cette montée en puissance doit être accompagnée avec précaution. Monique Axelos préconise de se méfier des dérives comportementales, qui pourraient inciter à ne pas recycler les produits sous prétexte qu'ils seraient biosourcés et donc assimilés à des produits facilement biodégradables. « *Dans une logique d'économie de la ressource, c'est important de fabriquer des matériaux dont on maîtrise les propriétés, qui durent et dont on envisage un réemploi* ». Il faut aussi se poser des questions sur l'impact d'une récolte des résidus végétaux, fertilisants naturels des sols, rester cohérent sur la distance de transport, et s'assurer d'une bonne gestion des ressources pour éviter des compétitions entre filières : les pailles de céréales (voir p. 83) sont notamment déjà utilisées comme litière pour les animaux, matière à méthaniser ou comme source de carburant liquide de seconde génération dans les bioraffineries. ●

1. Source Alliance mondiale pour les bâtiments et la construction (GlobalABC) – ONU, [url.inrae.fr/3Vwk25f](http://url.inrae.fr/3Vwk25f)

2. Source ministère de l'Écologie : [url.inrae.fr/3sSU5AI](http://url.inrae.fr/3sSU5AI)

3. La méthode ACV calcule l'impact environnemental d'un produit ou matériau, de l'extraction des matières premières à son propre recyclage. Voir article p. 79.

4. Le plan d'action Climat est un plan de mesures économiques et budgétaires annoncé en avril 2022 par le gouvernement pour accompagner le secteur économique dans la transition environnementale. [url.inrae.fr/3T2oreA](http://url.inrae.fr/3T2oreA)

5. Source Cerema : [url.inrae.fr/3T0Jv5s](http://url.inrae.fr/3T0Jv5s)

## LEXIQUE

### Biomasse

Ensemble des matières végétales et animales renouvelables à l'échelle d'une vie humaine (cultures, pâturages, forêts, animaux, etc.) Non fossiles, ces matières peuvent être utilisées pour l'alimentation humaine ou animale, la manufacture de différents produits ou pour générer de l'énergie sous la forme de chaleur ou d'électricité.

### Produit biosourcé

Matériaux industriels (bioplastiques et composites) et molécules chimiques partiellement ou totalement issus de la biomasse, dont l'usage n'est ni alimentaire ni énergétique. Ils sont obtenus à partir de diverses ressources : prairies, cultures agricoles, arbustes, arbres et leurs résidus mais aussi déchets industriels organiques dits co- ou sous-produits.

### Écoconception

Démarche scientifique, technique et économique visant à intégrer les aspects environnementaux dans la conception et le développement de produits.

### Carbone renouvelable

Carbone issu de ressources végétales et animales, qui se renouvelle à l'échelle d'une vie humaine (environ

80 ans) et dont la consommation n'augmente pas la quantité nette de CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère.

### Bioéconomie

Économie de la photosynthèse et plus largement du vivant. Elle se base sur la production et la mobilisation de biomasse pour une valorisation optimale. Elle permet d'utiliser au maximum une énergie abondante, renouvelable et gratuite : l'énergie solaire.

### Biosphère

Définie ici comme la totalité des écosystèmes (organismes vivants et leurs milieux de vie) présents sur Terre, que ce soit dans le sol, l'eau ou l'atmosphère.

### Technosphère

Ensemble des objets, des matières en usage et des déchets créés par l'être humain et n'existant pas à l'état naturel sur Terre et dans l'atmosphère (ex. : le plastique, les matériaux composites), etc.

### Puits de carbone

Espaces naturels (océan, végétaux, sols, etc.) qui captent et stockent plus de carbone qu'ils n'en libèrent dans l'atmosphère. Cette capacité dépend de différents facteurs. Dans certaines conditions, ces « puits » peuvent être altérés et devenir émetteurs.

## SOBRIÉTÉ ÉNERGÉTIQUE

### Le retour au « local »

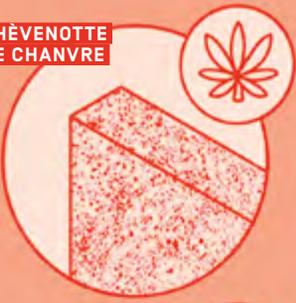
« *Construire avec des ressources végétales, dites biosourcées, est un pas primordial, mais cela ne peut être l'unique solution à nos problématiques d'émissions de carbone* », insiste Isabelle Capron, chercheuse INRAE, directrice du groupement de recherche « durabilités et matériaux biosourcés » porté par INRAE et le CNRS. Pour de nombreux scientifiques, dont son confrère Benoît Duchemin, ingénieur de recherche en science des matériaux à l'université Le Havre-Normandie, la question de la sobriété de nos consommations s'impose. « *En 2019, un scénario\* concluait qu'une rénovation massive des bâtiments des 28 pays européens avec de la paille permettait de stocker 500 à 700 millions de tonnes de CO<sub>2</sub> sur les 200 prochaines années. Mais même avec cette technique ambitieuse et prometteuse, nous ne compenserions que 60 % des émissions mondiales de CO<sub>2</sub> d'une seule année d'activités dues au seul torchage de gaz de l'industrie pétrolière qui consiste à brûler, par des torchères, des rejets de gaz fossile à différentes étapes de l'exploitation du pétrole et du gaz naturel.*

*Ce n'est qu'une infime partie des émissions de GES d'origine fossile.* » Donc innover ne suffit pas, il faut aussi moins consommer. « *Nous, scientifiques, développons des procédés ou des produits 100 % biosourcés et 100 % biodégradables, à partir de résidus forestiers, agricoles ou des déchets alimentaires de l'industrie (drêche de brasserie, peaux de tomates, coques de noix...)* », reprend Isabelle Capron. « *Mais ces ressources sont produites localement, et en quantité limitée. On parle de gisements de niches. De plus, transporter des déchets pour produire des matériaux biosourcés peut devenir trop onéreux pour être rentable, il faut donc penser à une échelle locale, idéalement la métropole* », conclut la chercheuse. Des résultats qui plaident pour une orientation de nos sociétés vers des systèmes d'économie circulaire où la production répond en priorité à un besoin local.

\* D'après : Duchemin C., 2021. La biomasse : remède miracle pour le climat ? La Vie des idées. [url.inrae.fr/3NyRTrq](http://url.inrae.fr/3NyRTrq)

2

CHÈVENOTTE  
DE CHANVRE



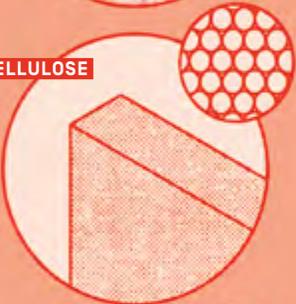
7

PAILLE  
DE TOURNESOL



3

CELLULOSE



9

CHAMPIGNONS  
EN CULTURE



4

Effet répulsif

# 9 matériaux biosourcés pour bâtir demain

Mur, sol, isolant, peinture, de plus en plus de constructions font appel aux matériaux biosourcés. Retour sur neuf procédés innovants, conçus en collaboration avec des chercheurs INRAE, pour en finir avec les ressources qui s'épuisent.





Mur enduit

6  
Revêtement

Béton recyclé

- A Isolant intérieur en fibre végétale
- B Film d'étanchéité [pare-vapeur]
- C Panneau en fibre de bois [OSB]
- D Film pare-pluie
- E Bardage en bois local

- F Les parois alvéolées des matériaux biosourcés en font d'excellents régulateurs thermiques avec une inertie supérieure aux matériaux conventionnels, réduisant le besoin de chauffage ou de climatisation.

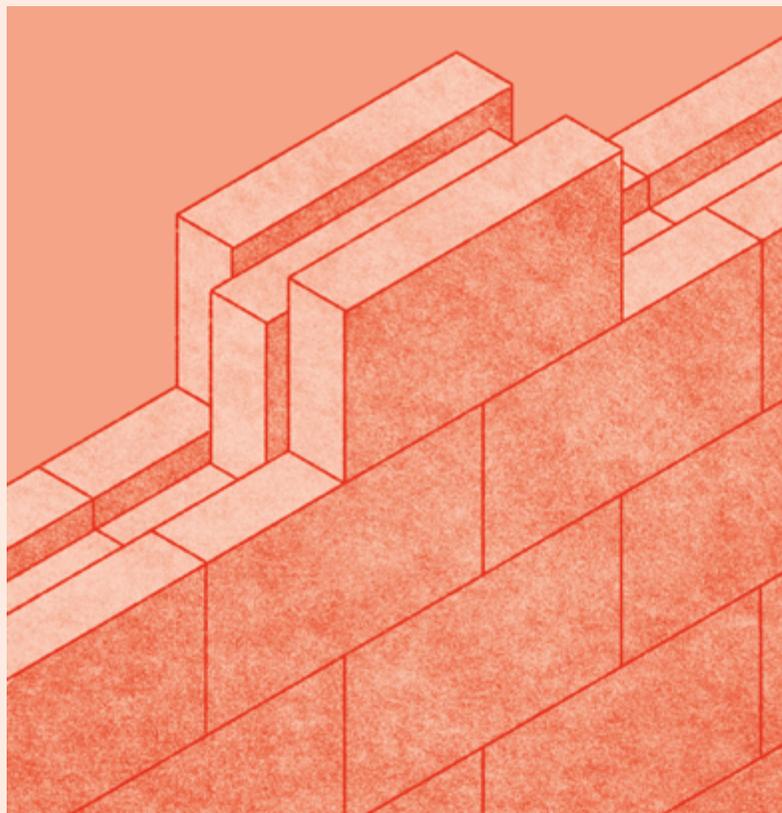
Effet répulsif

1

BREVET

## Combattre les bactéries avec de la cellulose

Pour protéger un revêtement, un film alimentaire ou une peinture d'une contamination par des microorganismes, l'industrie s'est massivement tournée vers les nanoparticules d'argent pour leurs propriétés biocides. Problème : avec le temps, ces nanoparticules ont tendance à se retrouver dans l'environnement puis dans les organismes vivants, pouvant impacter à terme la biodiversité. INRAE, associé à des partenaires publics et privés au sein du laboratoire d'excellence SERENADE, a développé un procédé pour réduire au maximum la quantité de ces particules toxiques, notamment au sein de peintures. Pour cela, les chercheurs se sont tournés vers des nanocristaux de cellulose issus de l'industrie du papier – mais pouvant potentiellement être obtenus à partir de n'importe quelle source végétale – entièrement naturels et biodégradables. Les nanoparticules d'argent se fixent sur ces nanocristaux de cellulose, via un processus permettant de contrôler leur nombre, leur répartition ou leur taille. Le produit obtenu relargue la quantité minimum possible d'argent, avec un effet biocide plus important qu'une peinture classique grâce à une répartition plus efficace de ces nanoparticules. En attendant une éventuelle commercialisation de ces produits plus écologiques, INRAE a breveté cette nouvelle technique en 2020.



2

PERFECTIONNEMENT

## Le béton de chanvre, 35 ans d'expérience

La première maison rénovée à l'aide d'un béton de chanvre a vu le jour en 1986. Derrière ce béton biosourcé se trouve la chènevotte, partie ligneuse des tiges de chanvre, débarrassée des fibres externes, mélangée à un liant minéral, le plus souvent de la chaux. *« Depuis plus de 30 ans, ce béton de chanvre s'est révélé très performant dans divers types de constructions individuelles et collectives, et divers environnements ruraux ou urbains. Ses excellentes propriétés d'isolation thermique et phonique en font donc un matériau incontournable pour la maîtrise de consommation d'énergie et du confort thermique des habitations »,* décrit Bernard Kurek, directeur de recherche INRAE au sein de l'unité Fractionnement des agro-ressources et environnement (FARE) à Reims. *« Parfois, il y avait des ratés, le liant et la chènevotte ne prenaient pas bien, ce qui peut avoir des conséquences catastrophiques sur un chantier. Avec un industriel et l'École de l'aménagement durable des territoires (ENTPE) de Lyon,*

*nous avons travaillé dès 2010 sur la relation entre matière végétale et liant. »*

Une thèse<sup>1</sup>, portée par INRAE et soutenue en 2013, a notamment permis d'identifier dans la chènevotte les mécanismes responsables, dans certaines conditions, de retarder la prise du liant et d'aboutir ainsi à ces désordres. Ces connaissances ouvrent la voie à la mobilisation d'autres tiges végétales pour des usages similaires. Depuis, INRAE travaille avec la société Fibres Recherche Développement à améliorer la qualité des chènevottes, et les possibilités des autres fibres végétales. À raison : le chanvre constitue une matière première des plus intéressantes écologiquement, nécessitant peu d'eau ou d'intrants tout en absorbant autant de CO<sub>2</sub> à l'hectare que certaines forêts<sup>2</sup>.

1. Diquelou Y., 2022. **Interactions entre les granulats de chanvre et les liants à base de ciment et de chaux : Mécanismes de la prise et propriétés des interfaces formées dans les agrobétons.** Thèse. Université de Reims.

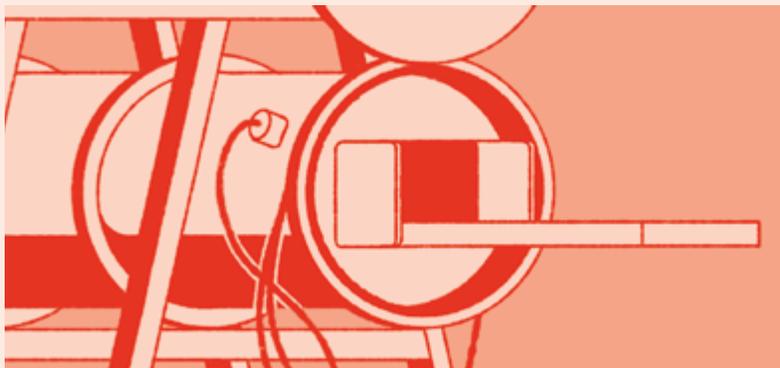
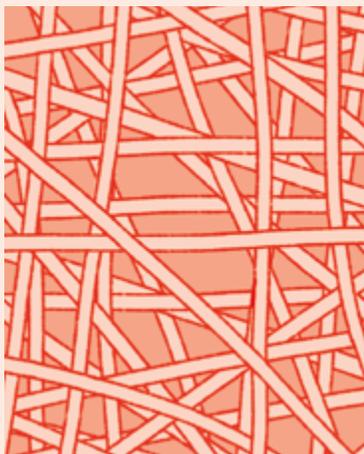
2. Toutes les forêts ne sont pas équivalentes en termes d'absorption du CO<sub>2</sub>. Un nouvel outil permet d'évaluer et suivre leur capacité Biomass Carbon Monitor - [url.inrae.fr/317QVhN](http://url.inrae.fr/317QVhN)

3

## PROCÉDÉ

## La cellulose comme superisolant

Depuis maintenant plus de 10 ans, l'unité INRAE Biopolymères, interactions, assemblages (BIA) travaille sur la capacité de la cellulose à stabiliser des émulsions. Pour mélanger deux liquides normalement non miscibles, comme l'huile et l'eau, il fallait jusqu'ici utiliser des tensioactifs potentiellement nocifs pour l'environnement. L'unité BIA les a remplacés par des nanofibres de cellulose, entièrement biodégradables et renouvelables. Parmi les applications possibles de ce procédé, les chercheurs ont notamment développé des « superisolants ». « Pour augmenter les propriétés isolantes d'un matériau, il faut pouvoir réduire la densité et la taille des pores de ce matériau, explique Isabelle Capron, directrice de recherche au sein de l'unité BIA. Or, avec notre procédé, il devient possible de contrôler précisément ces paramètres. » Après séchage, cette émulsion stabilisée uniquement par les nanofibres de cellulose prend la forme d'un panneau rigide doté d'impressionnantes capacités isolantes, plus efficace que la laine minérale ou le polystyrène. « Nous travaillons encore sur le procédé pour améliorer la résistance, conclut Isabelle Capron, et nous rapprocher des normes existantes dans le bâtiment. » Avec comme seuls composants de l'eau, de l'huile végétale et de la cellulose.



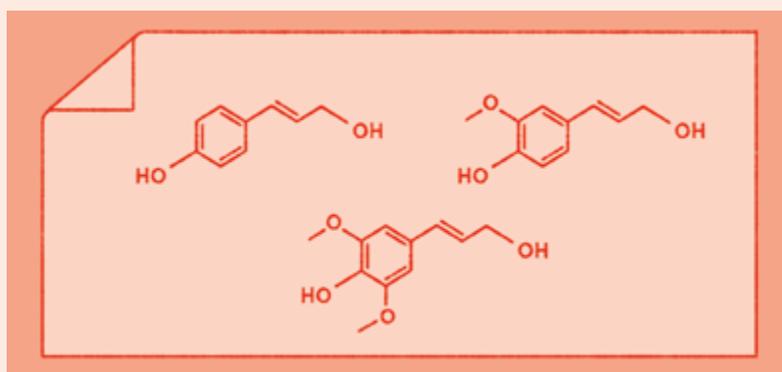
4

## BOIS LOCAL

## Pour des bardages sans traitement chimique

En 2021, nous avons importé 3,21 millions de m<sup>3</sup> de bois résineux et 134 700 m<sup>3</sup> de bois tropical à des fins de construction. Ainsi, en France, 1 maison sur 10 serait construite avec du bois importé. Pour favoriser une filière de production locale à faible empreinte carbone, le Laboratoire d'études et de recherche sur le matériau bois (Lermab) dans le Grand Est a

développé dès 2013, en collaboration avec la société MSL Lorraine, le procédé FURALOR d'élaboration de bois composite par polymérisation de monomères issus de déchets de bois de hêtre (une essence feuillue présente dans toute l'Europe). Le matériau ainsi obtenu présente des performances techniques améliorées par rapport au bois de hêtre sur pied. Plus résistant aux intempéries (et donc aux champignons et microorganismes), il peut servir aux applications en extérieur : bardages, murs antibruit, mobilier de jardin, parquets extérieurs, etc. Des essais pilotes sont à l'étude pour optimiser le procédé.



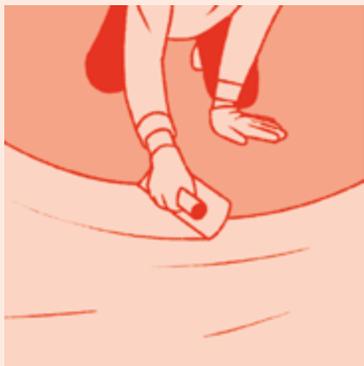
5

## TECHNOLOGIE

## Des revêtements aux propriétés antimicrobiennes

Et si demain nos fenêtres possédaient un film anti-UV ou nos murs et sols repoussaient physiquement les microbes ? Les lignines sont des composés chimiques naturellement présents dans les plantes fibreuses comme le chanvre et le bois. Ces molécules organiques ont la particu-

larité d'être anti-UV, antioxydantes et antimicrobiennes. Les scientifiques de l'UMR FARE ont cherché à exploiter ces capacités en mélangeant différents types de lignine avec un solvant eau/alcool, puis en appliquant ces mélanges sur différentes surfaces. Ils ont pu obtenir des films de revêtement de surface conservant ces propriétés qui pourraient déboucher sur le développement de peintures ou d'enduits biosourcés et antimicrobiens. Une technologie brevetée qui intéresse les professionnels du bâtiment.



6

#### DÉVELOPPEMENT

## Green Epoxy : vers des résines naturelles

Les résines époxy se sont répandues dans presque tous les secteurs industriels, jusqu'à atteindre les particuliers. Problème, ces résines utilisent pour la plupart du bisphénol A, reconnu comme perturbateur endocrinien, et nécessitent un durcisseur généralement issu de ressources fossiles. Entre 2015 et 2018, plusieurs acteurs de l'industrie et de la recherche – dont INRAE – se sont regroupés au sein du projet Green Epoxy afin de développer des résines entièrement biosourcées.

À la base de ces dernières : les polyphénols, des molécules présentes dans tous les végétaux, souvent nommés tanins – issues ici de sous-produits de la filière bois. Pour INRAE, ce grand projet à 2,8 millions d'euros s'est poursuivi à travers le programme européen NoAW<sup>4</sup>, grâce auquel plusieurs améliorations ont été développées, tant au niveau des durcisseurs que de l'origine même des polyphénols. Plutôt que le bois, ces tanins<sup>5</sup> ont pu être extraits de marc de raisin. Ces deux projets consécutifs ont finalement mis en lumière la faisabilité technique de résines époxy 100 % naturelles et biosourcées. Cependant, le coût de fabrication, encore supérieur aux résines chimiques, freine leur mise sur le marché au niveau industriel.

4. Projet européen Horizon2020 No Agricultural Waste - [noaw2020.eu/](http://noaw2020.eu/)

5. Les tanins sont en fait une catégorie de polyphénol.

7

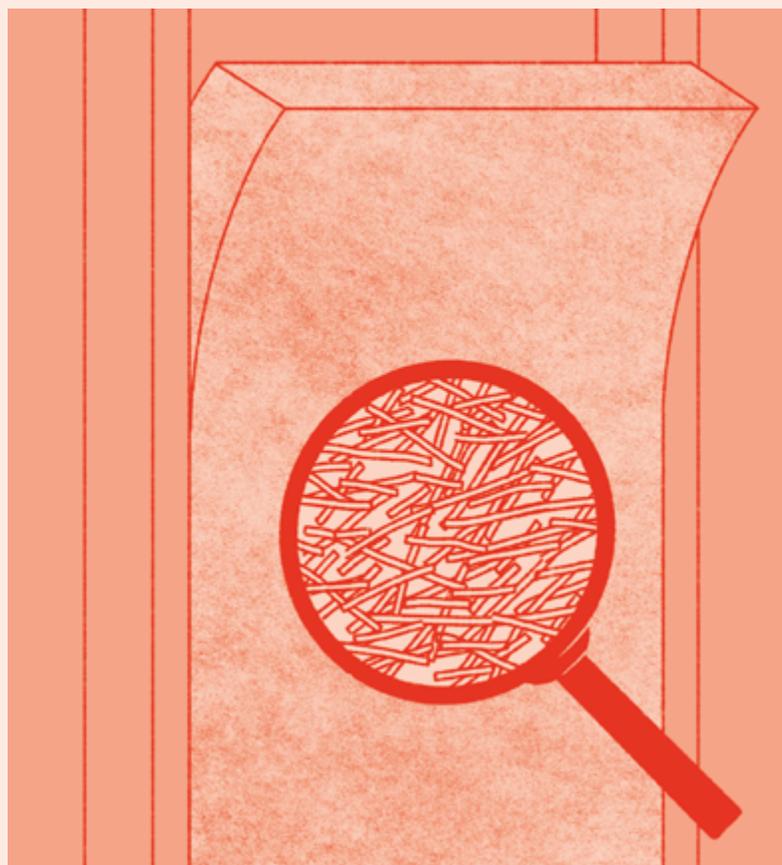
#### ISOLATION

## Tournesols et crustacés

Avec plus de 750 000 hectares de tournesol semés en 2022, la France fait partie des plus gros producteurs européens. Mais une fois les précieuses graines récoltées, les tiges sont le plus souvent laissées dans les champs, ou brûlées pour la production d'énergie. Pourtant, leur richesse en fibres et leur porosité, apportant respectivement résistance et isolation thermique, en font de bonnes candidates pour des panneaux isolants dans le secteur du bâtiment. Entre 2011 et 2015, INRAE a mené avec d'autres partenaires le projet Demether pour valoriser ces sous-produits agricoles inutilisés. Les tiges broyées ont été mélangées avec un liant de chitosane, produit à partir d'une substance présente notamment dans la carapace des crustacés. Un liant naturel, biodégradable et possédant de surcroît des propriétés antibactériennes. Le projet Demether a finalement abouti

à la conception de prototypes de panneaux isolants particulièrement peu onéreux à produire, valorisant des résidus agricoles jusqu'ici inutilisés. Plusieurs partenaires industriels se sont emparés de ces résultats dans l'optique d'une commercialisation. À noter que la recherche publique comme privée s'intéresse également à d'autres fibres végétales pour leur pouvoir isolant. INRAE s'est par exemple intéressé au lin à travers le projet SINFONI<sup>5</sup>. Si les panneaux intégrant les fibres de cette plante herbacée ont de bonnes propriétés isolantes et phoniques, leur sensibilité à l'humidité exclut pour le moment leur utilisation en extérieur. La recherche continue donc. Car dans une industrie de l'isolation dominée à 92 % par les laines minérales, dangereuses pour la santé humaine, et les plastiques alvéolaires, peu écologiques, ces isolants à base de fibres végétales ouvrent d'immenses perspectives.

3. Projet de recherche et développement structurant pour la compétitivité du premier programme d'investissements d'avenir déployé par l'État français.





## 8 TRANSFORMATION Des pierres de déchets

C'est l'angle mort du recyclage. En France, quelque 40 millions de tonnes de déchets non recyclables sont enfouis ou incinérés chaque année. En interrogeant différents experts du Carnot 3BCAR, la start-up Néolitha a trouvé une autre porte de sortie pour ces déchets ultimes : les transformer en pierre. Plus précisément en granulats, ces fragments de roche utilisés dans le secteur de la construction (sous-couche

routière, béton, etc.). Les déchets sont broyés en une poudre fine, à laquelle sont ajoutés de l'eau et un liant, formant alors de petites pierres constituées à 80% de déchets. La start-up fondée en 2019 s'est d'abord tournée vers les restes de chantier (isolants, plâtre, bois...) avant d'élargir sa matière première aux déchets ménagers et industriels. En 2022, Néolitha annonçait la création d'un site industriel de plus de 11 ha près d'Angers, ambitionnant pour 2023 de produire 24 « fossilisateurs » capables de traiter chacun 20 tonnes de déchets par jour. Un programme ambitieux, à la hauteur de l'enjeu.

## 9 INNOVATION Des champignons 2 en 1

Les champignons filamenteux ont la capacité de se lier les uns aux autres et de proliférer en l'espace de quelques jours. Les équipes des laboratoires de chimie Agro-industrielle, de l'UMR Biodiversité et biotechnologies fongiques (BBF) à Marseille et du centre d'application et de traitement des agroressources ont eu, en 2019, l'idée d'utiliser cette faculté pour produire des matériaux à partir de résidus agricoles sous forme de copeaux. Après traitement thermique et mécanique des fibres, le champignon candidat est inoculé au mélange et mis en culture sous atmosphère contrôlée. À l'issue de ce processus, selon la densité initiale des fibres, le matériau est plus ou moins aéré. S'il est très aéré, ses propriétés sont proches de celles

de polystyrène ; il peut servir comme emballage ou isolant thermique. Au contraire, le matériau peut être très compact s'il est précédé d'une étape de fermentation et de thermopressage. Dans ce cas, il pourrait remplacer les panneaux de particules de bois (« aggloméré ») pour les constructions éphémères. Autre avantage : ce matériau est entièrement biodégradable et peut servir d'amendement agricole en fin de vie.



## Un réseau pour des partenariats d'innovation

3 questions à Coraline Caultet,  
chargée d'affaires du Carnot 3BCAR

Depuis 2011, le Carnot Bioénergies, biomolécules et matériaux biosourcés pour la valorisation du carbone renouvelable (3BCAR), porté par INRAE, collabore avec les entreprises pour développer des innovations durables et écoconçues.

### Qu'est-ce qu'un Carnot ?

C'est un réseau de laboratoires et de centres techniques qui a reçu le label Carnot. Celui-ci reconnaît les compétences des chercheurs à collaborer avec les entreprises sans intermédiaire selon un protocole contractuel ISO 9001. Cette labellisation est réévaluée tous les 4 ans par l'Agence nationale de la recherche (ANR) qui s'assure de l'excellence scientifique et du taux de contractualisation des laboratoires du réseau avec les entreprises.

### Comment fonctionne 3BCAR ?

Les entreprises sollicitent le Carnot 3BCAR avec une problématique dans le domaine de la bioéconomie. Nous les mettons en relation avec les chercheurs capables d'y répondre. De plus, nous finançons chaque année (env. 1,2 millions €/an) des projets qui explorent des idées couplées à un marché potentiel et des perspectives économiques. Ces projets favorisent la réalisation de preuves de concept\* qui sont protégées par des titres de propriété intellectuelle.

### Quelle est la force de ce dispositif ?

Les scientifiques accroissent leurs compétences en explorant des approches fondamentales et innovantes ; les industriels réduisent la prise de risque de la phase initiale qui permet de passer du concept à l'innovation. Cet écosystème bénéficie de l'expertise d'environ 550 scientifiques de nos 18 composantes, et des technologies de pointe de nos 23 plateformes. Les industriels s'assurent également que leurs produits ou procédés puissent être écoconçus, à toutes les étapes de production. Le transfert technologique se fait souvent avec les start-up qui prennent le risque, et sont ainsi un des maillons essentiels de la R&D en France.

\* Projets et titres de propriété intellectuelle issus du 3BCAR mis à jour tous les ans sur leur site.

# LES CONDITIONS DE LA DURABILITÉ

Produire des matériaux à partir de plantes herbacées ou d'arbres n'est pas sans impacts pour l'environnement : la récolte des résidus de cultures affecte la fertilité des sols et leur capacité à séquestrer du carbone, la production et la transformation restent émettrices de gaz à effet de serre (GES)... Les chercheurs d'INRAE œuvrent à déterminer les conditions de la durabilité de ces matériaux et de leur gestion.

**Perspectives.**



« Pour qu'un matériau biosourcé reste un puits de carbone, il faut le maintenir dans la technosphère et donc le réemployer », explique Michael O'Donohue, chef du département scientifique Transform d'INRAE. « Cela limite la dépense énergétique [de transformation, et de transport] et évite de nouvelles extractions qui génèrent de nouvelles émissions de GES, et des pollutions locales ou des impacts sur la biodiversité. »

Pour quantifier les différents impacts environnementaux des produits et matériaux, l'analyse de cycle de vie (ACV) est la méthode de choix, bénéficiant d'un standard international (ISO 14040). Le plus souvent elle est pratiquée sous une forme simplifiée, comme celle du bilan carbone mise en œuvre par des organismes privés ou publics. Dans ce cas, un seul critère est évalué : la différence entre le carbone stocké et celui émis lors de la création d'un produit ou d'un service. « Il y a un risque à simplifier, car il peut aussi y avoir des transferts de pollution entre les impacts : ce qui est bien pour un critère peut être mauvais pour un autre. Par exemple, réduire les pesticides implique un usage plus régulier du tracteur au champ et donc une augmentation de carbone fossile utilisé et émis, mais cette réduction diminue l'éco-toxicité et donc la pression sur les écosystèmes. Ne regarder qu'un critère peut conduire à de fausses bonnes idées », précise Arnaud Hélias, chercheur spécialiste de l'évaluation environnementale au sein de l'UMR Technologies et méthodes pour les agricultures de demain (ITAP) à Montpellier.

#### Analyse des flux entrants aux flux sortants

Or, sous sa forme multicritère, cette méthode « quantifie les impacts sur l'environnement à chaque étape au regard du bénéfice rendu par un produit ou un service », ajoute Arnaud Hélias. L'ensemble des flux nécessaires pour fabriquer un produit ou mettre en place un service est passé au crible : les ressources énergétiques, les matières premières et les transports nécessaires, etc. « Pour un matériau biosourcé par exemple, l'ACV remonte jusqu'à l'impact de la production au champ et au-delà : la fabrication de l'engrais, le transport d'intrant, la fabrication du tracteur, la production de son carburant à la raffinerie, etc. » En 2006, une ACV réalisée par INRAE sur le béton de chanvre<sup>1</sup> concluait « qu'un mur en béton de chanvre avec une ossature bois constituait un puits de carbone intéressant pour une durée de 100 ans », tout en recommandant de travailler sur la gestion de la fertilisation azotée du chanvre

pour limiter la pollution aux nitrates de l'eau, et sur l'optimisation de son transport coûteux et émetteur de GES (en moyenne près de 1000 km du champ au bâtiment).

Suite à la nouvelle réglementation environnementale des bâtiments (RE 2020), cette même méthode est utilisée par le Cerema pour réaliser les fiches de déclarations environnementale et sanitaire des matériaux biosourcés (FDES), un document normalisé à destination des constructeurs qui synthétise les performances techniques et environnementales des matériaux. Un premier pas pour accompagner une transformation à grande échelle de cette filière.

#### Vers une analyse à l'échelle du territoire...

Mais le raisonnement par produit et service cantonne ces évaluations par secteur et ne permet pas d'avoir une vision globale des problématiques environnementales. Les scientifiques de la Chaire ELSA-PACT ont ainsi adapté puis transposé la méthode ACV à l'échelle du territoire pour s'assurer que son développement économique et social génère le moins d'impact possible sur l'environnement. Pourquoi le territoire ? « C'est l'échelle adaptée pour faire évoluer nos modes de production et consommations », reprend Arnaud Hélias. « Sur ce périmètre, nous évaluons les impacts (GES, consommation d'eau, occupation des sols) et les services rendus par rapport aux enjeux de ces territoires (emploi, énergie, autonomie alimentaire). » La méthode débouche sur une carte du territoire identifiant les activités les plus polluantes. Les parties prenantes travaillent alors des scénarios d'évolution dont on →

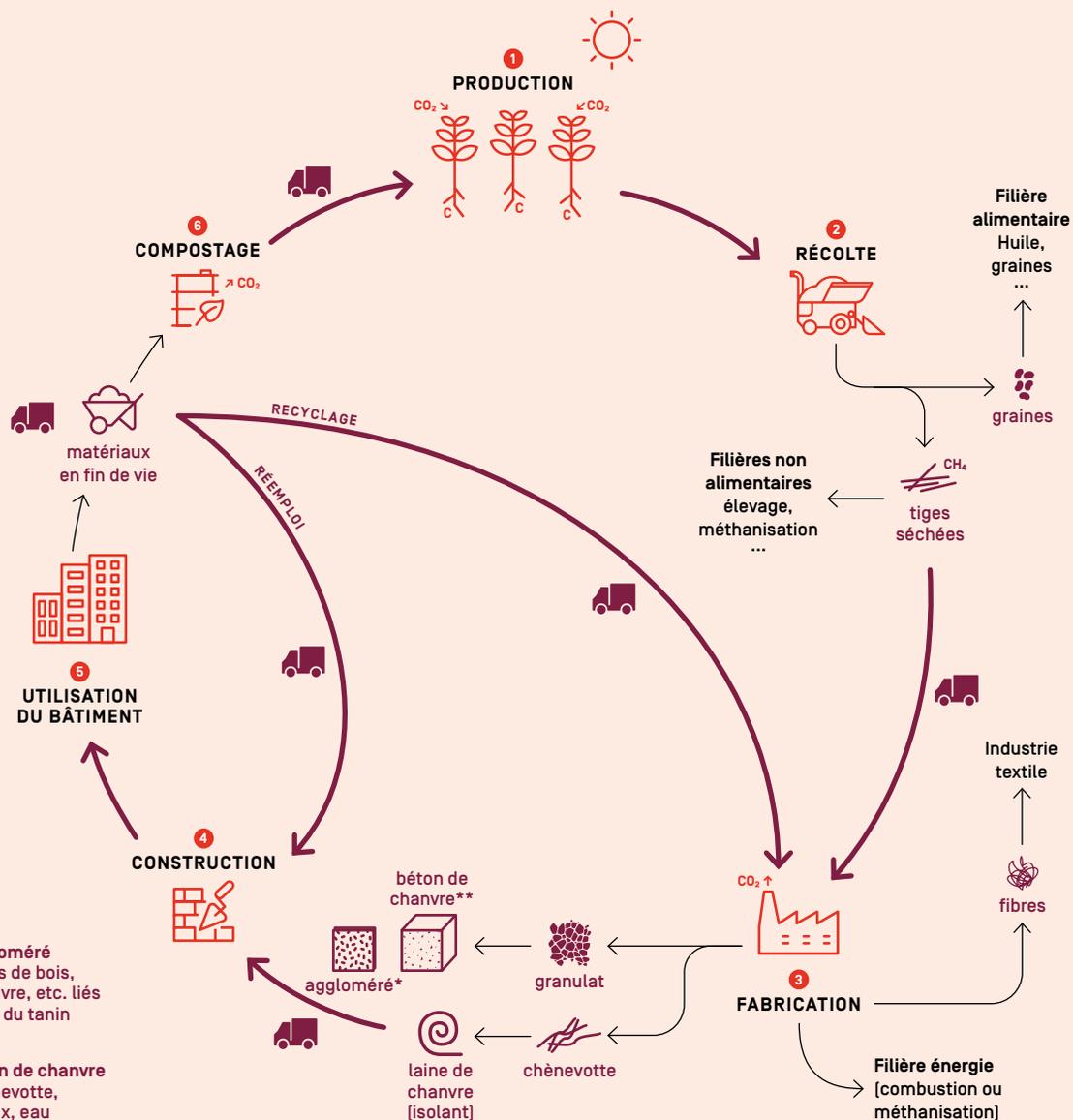
←  
Photo ci-contre  
Croissance et  
séchage de paille  
de lin en serre pour  
évaluer l'impact  
des conditions  
météorologiques  
sur la qualité des  
fibres.

**L'analyse de cycle de vie (ACV) est la méthode de choix pour quantifier les différents impacts environnementaux des produits et matériaux.**



# Le cycle de vie des matériaux biosourcés : l'exemple du chanvre

UN STOCKAGE DU CO<sub>2</sub> PENDANT PLUSIEURS DÉCENNIES ET UN MOINDRE IMPACT SUR L'ENVIRONNEMENT



Grâce à la photosynthèse **1**, les plantes captent le CO<sub>2</sub> présent dans l'atmosphère. Elles en utilisent une partie, sous forme de carbone, pour leur croissance, et en transfèrent une partie au sol. Ce carbone stocké par tiges, fibres et autres composants végétaux n'est habituellement rendu à l'atmosphère qu'en cas d'incendies, ou partiellement lors de la décomposition des plantes. Lorsque la tige est récoltée et utilisée en matériau **2**,

le CO<sub>2</sub> capté reste piégé durant toute la durée de vie du matériau, actuellement estimée à 50 ans. En fin de vie, selon leur état, ces matériaux peuvent être réemployés sans transformation, recyclés pour d'autres usages, compostés en champs (à condition d'être 100 % végétal) et par compostage industriel ou utilisés comme sources d'énergie par combustion ou méthanisation **6**. Dans ces deux cas derniers, le carbone stocké est

restitué à l'atmosphère et boucle son cycle. En plus de cette capacité de stockage du CO<sub>2</sub>, substituer des matériaux pétrosourcés par ceux issus de résidus agricoles ou de ressources forestières permet également de réduire les émissions annexes et pollutions de l'environnement dû à l'extraction, la fabrication et le recyclage de ces ressources épuisables [pétrole, sable, minerais...] **3 4 5**.

# La méthode ACV a été adaptée à l'échelle du territoire pour s'assurer que son développement économique et social génère le moins d'impact possible sur l'environnement.

peut évaluer les performances environnementales. Elle fait aussi le point sur les pollutions réalisées à l'extérieur du territoire, souvent oubliées. Récemment développée, la méthode<sup>2</sup> reste coûteuse et encore peu mise en œuvre en dehors des laboratoires mais a déjà permis le développement du logiciel WASABI pour comparer les scénarios d'aménagement et d'approvisionnement en eau d'un territoire.

## ...pour une bioéconomie plus performante

D'autres approches existent pour accompagner la transition des territoires. La démarche Maelia, développée par le laboratoire Agronomie et Environnement (LAE) dans le Grand Est, simule la quantité et la répartition de la biomasse agricole produite, à l'échelle de la parcelle comme de la région, à partir de données sur les sols (occupation, structure, hydricité), de données météo et d'estimations de la croissance des plantes. « On est capables de modéliser ce qui est planté, récolté et le devenir de ces cultures quotidiennement sur 50 ans dans près de 8 000 parcelles », indique Julie Wohlfahrt, spécialiste des systèmes bioéconomiques au sein de l'unité. Dans ces modélisations, les scientifiques intègrent aussi la diversité des pratiques des agriculteurs (labour, irrigation, rotation de cultures, récoltes...) et leur impact environnemental ainsi que le rendement, le temps de travail et les transports des biomasses dans les territoires. Proposée aux acteurs des territoires par le bureau d'étude Maelab<sup>3</sup>, la plateforme a déjà permis de

conseiller des collectivités locales dans leurs projets de bioéconomie.

## Concevoir et évaluer les projets de développement

Aujourd'hui, l'équipe tente d'adapter les fonctionnalités de Maelia à d'autres filières biosourcées : bioplastiques, biomatériaux de construction, production de paille et de bois. « L'objectif, reprend Julie Wohlfahrt, c'est de modéliser à terme l'ensemble des usages de la biomasse d'une région pour pouvoir orienter les choix du territoire en fonction des interactions villes et campagnes. Par exemple : à quelles conditions pourra-t-on construire en 100 % biosourcé dans le Grand Reims ? A-t-on assez de ressources agricoles et forestières à proximité pour assumer ce choix ? Qu'advient-il des filières déjà existantes comme le chanvre textile ou le granulat de bois ? Comment s'assurer que les matériaux en fin de vie retournent fertiliser les champs d'origine après compostage ? Et quel est l'impact des nouvelles filières en termes d'émissions de gaz à effet de serre liées au transport ou à la fabrication de ces matériaux ? » Il faudra attendre 2028 pour la réponse. Le Grand Reims est l'un des six territoires pilotes pour fournir des données aux « scénarios pour des bioéconomies durables dans les territoires » du Programme d'équipement prioritaire de recherche (PEPR) FairCarboN, lancé en avril 2022. Financé à hauteur de 40 millions d'euros par le plan d'investissement gouvernemental France 2030 et copiloté par INRAE et le CNRS, ce programme vise d'ici à 6 ans de proposer, à l'échelle locale comme globale, des trajectoires adoptables d'atténuation du changement climatique grâce aux capacités réelles de nos écosystèmes agricoles et forestiers. ●

**STOCKAGE  
DE CARBONE  
DURANT LE  
CYCLE DE VIE  
DU MATÉRIAU**

**Charpente en bois  
industrielle**

**210 KG**

de carbone/m<sup>3</sup>  
de bois pour  
100 ans

**Laine de chanvre  
[isolant mural]**

**1,05 KG**

de carbone/m<sup>2</sup>  
pour 50 ans

Source : **fiche FDES,  
Inies, Nov 2022.**

1. [url.inrac.fr/3UjDT7g](http://url.inrac.fr/3UjDT7g)  
2. [youtu.be/9NzuZGY9XG4](https://youtu.be/9NzuZGY9XG4)  
3. [maelab.fr](http://maelab.fr)

# LES RESSOURCES SONT-ELLES SUFFISANTES ?

Les produits biosourcés présentent un intérêt pour diminuer nos émissions de gaz à effet de serre et favoriser le stockage de carbone à long terme. La filière du bâtiment n'est pas la seule à s'y intéresser. Comment s'assurer que les résidus et les cultures dédiées assurent un approvisionnement suffisant à ces nouvelles activités sans entrer en compétition avec les productions déjà existantes, dont celles alimentaires ?

## Analyse.

Cultures dédiées, résidus de cultures, résidus forestiers... Les ressources végétales pour remplacer celles fossiles sont nombreuses et variées. Mais ces ressources sont déjà recherchées et certaines filières les mobilisent depuis longtemps : pailles pour l'élaboration de litières en élevage en France ou résidus forestiers comme combustible dans les pays du Nord de l'Europe. De nouvelles filières entrent dans la compétition : par exemple, la pharmacutique sollicite les résidus du bois pour l'extraction de molécules, et la production de biogaz par méthanisation fait appel notamment à des résidus végétaux. Pour répondre à la demande en biomasse végétale, il faudra réunir les biomasses et leurs résidus disponibles sur nos territoires, sans entrer en concurrence avec l'alimentaire.

Pour Monique Axelos, « il est important de favoriser l'utilisation de résidus de cultures plutôt que de cultures dédiées afin d'éviter ces compétitions sur l'usage des terres, ou de réduire les cultures dédiées à des parcelles peu performantes comme des zones de friches par exemple ». Sur les 4,9 milliards d'hectares de terres agricoles mondiales, 3% sont dédiés à des usages non alimentaires, en particulier sources de ma-

**4,9 Mrd ha**  
de terres agricoles  
dans le monde,  
dont 3% sont  
dédiés à des  
usages non  
alimentaires

tière (résidus) pour produire des matériaux biosourcés. L'ensemble de ces cultures est réparti de manière hétérogène dans l'Hexagone. Sans compter que chaque culture a sa période de récolte (mars pour le miscanthus, octobre pour le chanvre) et une production annuelle variable selon les conditions météorologiques. En France, d'après Hélène Lenormand, enseignante-chercheuse à l'Institut polytechnique UniLaSalle<sup>1</sup>, « 15 millions de tonnes de particules végétales issues de résidus agricoles pourraient être valorisées chaque année pour la construction (béton de chanvre, isolant...). Mais ce chiffre comprend les particules ayant déjà des valorisations traditionnelles ou innovantes comme la bioénergie et la chimie verte. »

### Des estimations en majorité modélisées mathématiquement

Comment s'assurer alors qu'on dispose à l'échelle nationale, européenne ou mondiale des ressources suffisantes pour toutes les filières ? C'est à cette question que Lorie Hamelin, bioéconomiste spécialiste en génie environnemental au Toulouse Biotechnology Institute (TBI) tente de répondre →

# MATÉRIAUX BIOSOURCÉS : ORIGINES ET USAGES EN FRANCE

en tonne de matières sèches par an (tMS/an)



## RÉSIDUS DE CULTURES ANNUELLES

### 1 PAILLE DE CÉRÉALES 9,2 M ha

= 50 841 tMS/an  
produites dont :

—  
Blé tendre, blé dur, orge,  
avoine, seigle, triticale

= 13 303 tMS/an  
disponible dont :

10 185 tMS/an  
litières pour les animaux  
d'élevage, puis fumier

60 tMS/an  
paillage pour la production  
de champignons

3 050 tMS/an  
pour les autres usages

—  
Paille de maïs doux et  
maïs à grain [canne]

= 12 044 tMS/an produites  
= 1728 tMS/an théoriquement  
disponibles

Aucun volume d'usage n'est  
pour le moment estimé. Le plus  
souvent laissées au sol.

50%  
des pailles sont  
récoltables

### 2 PAILLE D'OLÉAGINEUX\* 1,9 M ha

= 14 667 tMS/an produites  
= 1 098 tMS/an récoltables  
(hors retour au sol organique,  
60 % de perte lors de la fauche)  
Aucun n'usage n'a été identifié.

\*colza, tournesol, soja, lin  
oléagineux, cameline et moutarde

### 3 PAILLES DE PROTÉAGINEUX\*\* 213 000 ha

= 533 tMS/an produits  
Aucune technique de récolte  
n'existe, ces pailles ont un intérêt  
agronomique pour les sols.

\*\*fèverre, féverole, pois, lupin doux

## 4 CULTURES DÉDIÉES

### MISCANTHUS 6 400 ha

= 58 tMS/an

produits et récoltables dont :



- 60% utilisés comme combustible  
(four à déshydratation, chaudière)
- 20% utilisés pour  
la litière d'élevage
- 20% utilisés pour  
le paillage horticoles

### FIBRE DE LIN 118 900 ha

= 808 tMS/an

produites et récoltables dont :



- 53% à destination de  
la filière des matériaux
- 16% à destination de la filière  
énergie par combustion
- 31% à destination de  
la filière textile

### CHANVRE INDUSTRIEL 14 500 ha

= 66 tMS/an

produites et récoltables dont :



31,5% à destination de la  
filière des matériaux (construction,  
isolation, papier, bioplastiques...)

25,5% à destination de  
la filière litière d'élevage

10,5% à destination  
de la filière paillage

0,3% à destination  
de la filière textile

9% à destination  
de la filière « autres »

22,5% disponibles principalement  
sous forme de poudre

## LE BOIS

17 M ha  
en France métropolitaine

38 M<sup>3</sup>  
de récolte de bois  
commercialisés

Menus bois  
issus de taillis à courtes  
rotation (TCR)  
4 100 ha  
= 41 tMS/an produites et  
récoltables  
La totalité est utilisée pour les filières  
énergie et biomatériaux

Bois d'œuvre  
(grumes pour sciage et placage)  
première utilisation du bois  
19,6 M m<sup>3</sup>

● 95% dédiés au sciage  
● 2% dédiés aux lattes  
● 3% dédiés aux placages  
et contreplaqués

Sources : DGPE, données 2019 / FranceAgrimer, Observatoire national des ressources en biomasse, 2020. Les co-produits des industries agroalimentaires, non traités dans cette infographie, représenteraient aussi plusieurs milliers de tonnes de matières brutes.

## FERTILITÉ

### Laisser de la matière pour les sols

Prélever les tiges habituellement non récoltées des sols agricoles peut impacter la structure et la fertilité de ces derniers. En effet, la matière végétale en décomposition est source d'énergie (carbone) et de minéraux pour les microorganismes du sol. Ces tiges contribuent également à la structuration du sol : sa perméabilité, sa teneur en eau, et facilitent la prospection des racines. Dans le cadre du développement de filières biosourcées, il faut donc prendre en compte ce besoin agronomique du sol, et prévoir de conserver un volume de biomasse non récoltée pour assurer la fertilisation de ces espaces et en limiter l'érosion.

## CARBONE

### Stocker dans la paille, le bois ou le sol ?

Le projet Greenhouse gas management in European land use systems (GHG-Europe), terminé en 2013, a identifié le problème de la séquestration du carbone par les sols sans végétation.

«*Résultat ? Le sol devenait émetteur de carbone, dès qu'une partie de la paille était retirée du champ. Alors que quand la paille était enfouie, le sol restait puits de carbone*», explique Éric Ceschia, chercheur en modélisation spatialisée du fonctionnement des agroécosystèmes au CESBIO. Or l'exploitation accrue de biomasse est une des voies promues par le GIEC pour réduire nos émissions de gaz à effet de serre. De récents travaux nuancent ce propos : «*il faut savoir que sur la paille enfouie, près de 90 % du carbone retourne à l'atmosphère au bout d'un an sous l'effet de la décomposition des végétaux par les microorganismes du sol*», rappelle Lorie Hamelin, bioéconomiste spécialiste en génie environnemental au Toulouse Biotechnology Institute (TBI). Le pourcentage de carbone séquestré descendrait même à 1% au bout de 20 ans, car ce carbone est sous une forme moléculaire instable et difficilement assimilable. «*Nos données montrent que lorsqu'on s'assure d'épandre les résidus d'une production biosourcée (gaz ou huile) sur place, la séquestration de carbone est assurée sur 20 ans en quantité identique voire supérieure à l'enfouissement de la paille.*» En 2022, une thèse\* met également en lumière la capacité différenciée de stockage de carbone par certaines

plantes grâce à leurs racines. Ces cultures annuelles ou pérennes sont désignées comme des bio-pompes. La thèse conclut que pour les terrains à faible séquestration (moins de 50 tonnes éq CO<sub>2</sub>/ha), la plantation de plantes pérennes (peuplier, olivier, robinier faux-acacia) permettrait d'augmenter de 60 % cette séquestration. Depuis juin 2020, les forestiers peuvent quant à eux s'appuyer sur l'application gratuite FOR-EVAL \*\* développée par INRAE et l'ONF. Elle évalue la sensibilité des sols à la récolte de résidus forestiers (branche, feuillage, souche) pour d'autres usages (biogaz, biomolécules, biomatériaux). En s'appuyant sur cinq paramètres : la région climatique, la forme de l'humus, la granulométrie, l'acidité et la profondeur du sol, l'application émet un diagnostic instantané, sans analyse en laboratoire, sur l'impact de cette récolte. Elle aide le gestionnaire à adapter la période d'exploitation et les méthodes de transport de bois pour limiter l'érosion, le tassement par les machines et l'appauvrissement en nutriments des sols.

\* Zhou Shen. 2022. Simultaneous carbon storage in marginal lands and anthropogenic products through biopump : potential to induce negative

emission and environmental mitigation. Thèse. Université de Toulouse

\*\* url.inrae.fr/3fg2SDW



© INRAE - Jean Weber

à l'aide de modélisations mathématiques. « On se base sur des données de rendement de cultures, puis via différents modèles mathématiques on est capables d'estimer la quantité de résidus agricoles disponible à l'échelle départementale et régionale. Or, les modèles existants aboutissent à des résultats très différents, et donc pas fiables. Par exemple, sur les rendements de paille et de blé produits en 2000 et en 2018, on observe des écarts de 4 à 6 tonnes à l'hectare produites selon les modélisations. Notre étude a montré que pour l'instant aucune des estimations statistiques ne concorde, quelles que soient les ressources végétales étudiées. »

Afin de permettre des estimations plus fines, il faudrait pouvoir comparer les valeurs estimées par modélisation à des observations de terrain. En France, cette comparaison est faite par l'IGN pour les résidus de bois, qui interroge les forestiers sur le devenir du menu-bois : brûlé, broyé... C'est plus difficile à mettre en place pour les filières agricoles au vu de la diversité des surfaces, des pratiques et des typologies de plantes.

#### L'usage des satellites pour affiner les données de rendement

Pour Lorie Hamelin, la solution pourrait venir du ciel grâce à la modélisation basée sur l'imagerie

↑  
**Normandie**  
**Macération des pailles de lin en champs par la rosée et les microorganismes du sol. Cette opération appelée rouissage facilite la séparation de la moelle de la tige des fibres de l'écorce, et permet d'obtenir des fibres plus ou moins souples, plus ou moins résistantes.**

1. D'après l'article de *The Conversation* « Faire pousser des isolants thermiques : un panorama des matériaux disponibles en France ».

2. [url.inrae.fr/3TnLKQr](http://url.inrae.fr/3TnLKQr)

satellite, car « les observations satellitaires peuvent nous renseigner sur le type de biomasse plantée, et leur localisation exacte à 10 m près. »

Le CESBIO, une unité associant notamment INRAE et le CNRS, est à la pointe sur ces sujets. Il réalise notamment une carte annuelle d'occupation des sols : urbain, forestiers et agricoles à partir d'images satellitaires. « Le satellite capte un signal lumineux du rayon solaire réfléchi par le sol, puis peut estimer le volume de biomasse produite par analyse de sa longueur d'onde ou de sa couleur : bleu, rouge, vert, infrarouge... », explique Éric Ceschia, chercheur en modélisation spatialisée du fonctionnement des agroécosystèmes au CESBIO. « À partir de ces données, nous élaborons une courbe spécifique qui nous permet de distinguer ce que le satellite "voit" : de l'eau, une forêt, une parcelle de blé, un couvert intermédiaire, voire même le stade de croissance de la plante. On peut ensuite estimer le rendement de la parcelle par des calculs mathématiques. » Et les chercheurs espèrent aller plus loin avec le développement d'un outil qui permettrait de modéliser en temps réel, de l'échelle de la parcelle à celle du territoire français, les rendements agricoles en fonction de la météo. Les premières études réalisées sur le blé et le colza viennent d'être publiées<sup>2</sup>. ●