

# RØSSOURCES

La revue d'INRAE #3

janvier 2023

Décryptage

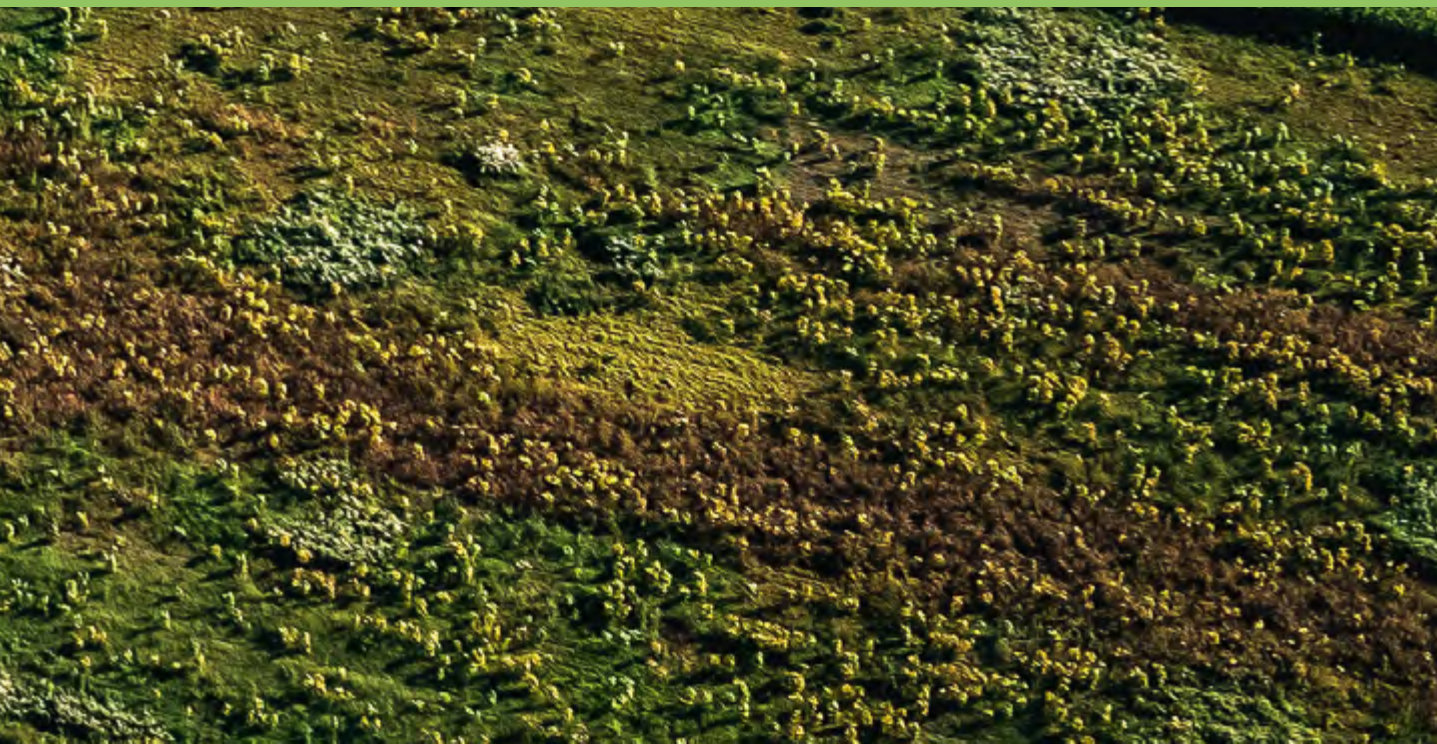
**Le potentiel  
insoupçonné  
des aliments  
fermentés**

Société

**Penser le  
numérique pour  
une agriculture  
durable**

Futurs

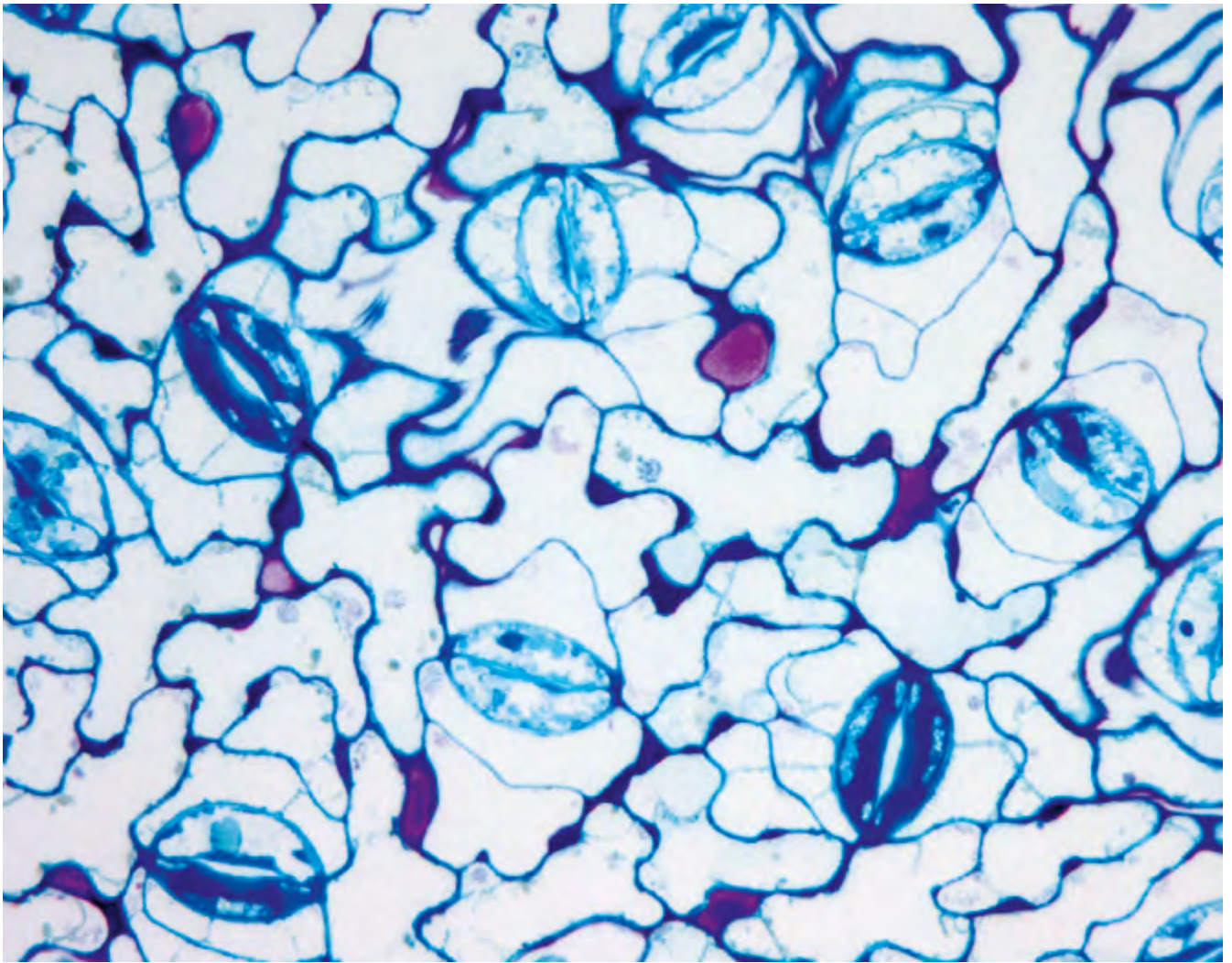
**Le biosourcé  
va-t-il verdir  
le bâtiment  
?**



En couverture  
**Champs avec bande  
enherbée, vue aérienne  
autour de Chalon-sur-Saône.**

© INRAE – Christian Slagmulder





↑

En surface

**Stomates à la surface interne  
d'une feuille de peuplier.**

**Observation en épifluorescence.**

**Coloration bleu de méthylène –  
azur II. Unité BIOFORA du centre**

**INRAE Val de Loire.**

© INRAE – Françoise Laurans



↑  
ADN givré  
**La cryoconservation des spermatozoïdes d'oiseaux domestiques par race permet d'évaluer leur fertilité et de**

**préservé ce patrimoine des espèces en voie de disparition. C'est la base de nombreux programmes de conservation de la biodiversité portés par**

**le Centre national de ressources biologiques pour les animaux domestiques (CRB Anim).**

Unité Physiologie de la reproduction et des comportements. Centre INRAE Val de Loire.

© INRAE – Anaïs Vitorino-Carvalho







Hyperparasitisme

Cette larve de Syrph (*Syrphus* sp), prédatrice des pucerons est mal partie. Déjà parasitée en son sein, elle se trouve piquée par une guêpe (famille des *Figitidae*). Au final le dernier arrivé mange le tout.

**Une façon d'assurer la descendance chez certains insectes.** Institut de Génétique, Environnement et Protection des Plantes, centre INRAE Bretagne-Normandie.

© INRAE – Bernard Chaumet



Life Without Ice

**Échantillonnage et analyse des contaminants dans les glaces pour évaluer l'impact écologique et social de la disparition des glaciers.**

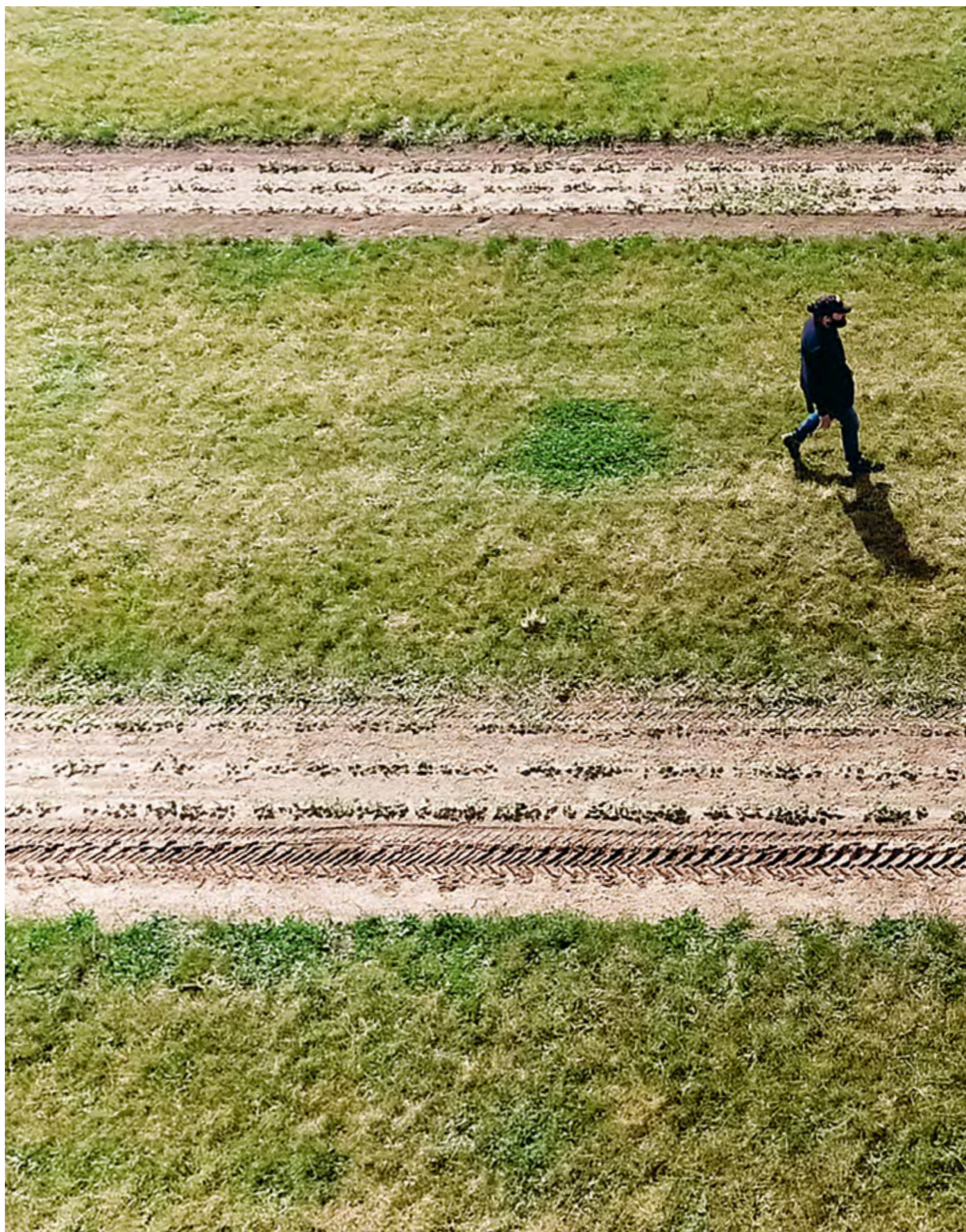
Unité Riverly, centre INRAE Lyon-Grenoble-Auvergne-Rhône-Alpes

© INRAE – Aymeric Dabrin









↑

Perspectives

**Test de désherbage robotisé sur un tracteur électrique guidé par Lidar, effectué durant le challenge Acre-Metrics sur**

**l'AgroTechnopole de Montoldre [42].** Recherches effectuées au sein du labcom ANR Tiara qui associe INRAE (UR TSCF - Centre INRAE

Clermont-Auvergne-Rhône-Alpes) et SabiAgri.

© INRAE





→ [page suivante]

À la loupe

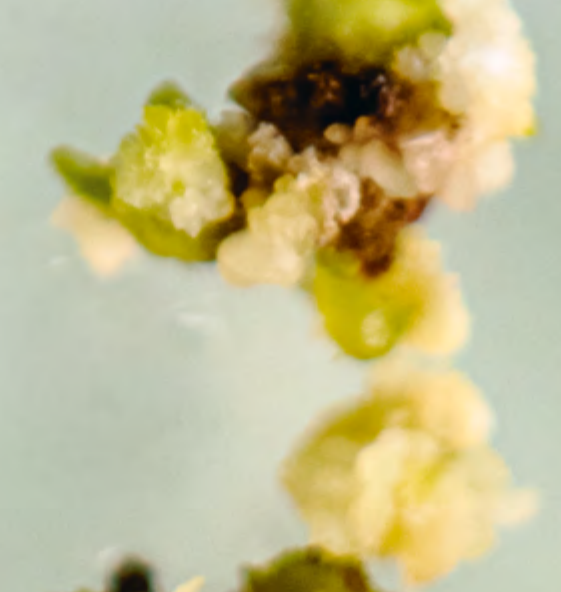
**Lignée d'embryons de rosier  
utilisée pour la validation  
fonctionnelle de gènes par  
l'institut de Recherche en**

**Horticulture et Semences de  
Beaucouzé, UMR rattachée au  
centre INRAE Pays de la Loire.**

© INRAE - Emma Termeau



2/20



25  
2020



À la mémoire de Maylis Gaillard, contributrice majeure de la création de cette revue, disparue le 31 août dernier.

**Éditeur**

Institut national de la recherche pour l'agriculture, l'alimentation et l'environnement  
147, rue de l'Université,  
75338 Paris cedex 07

**INRAE**

**Impression**

Biprint  
(78920 Ecquevilly)

**Dépôt légal**

4<sup>e</sup> trimestre 2022  
Tirage 7000 ex.  
EAN 9782759236275  
ISSN 2804-7559

**Directeur de publication**

Philippe Mauguin,  
PDG d'INRAE

**Direction éditoriale**

Comité éditorial  
*Ressources*

**Rédactrice en chef**

Aliette Maillard

**Coordination éditoriale**

Amaya Renaudin

**Secrétariat de rédaction**

Élodie Ruhr

**Design graphique**

Atelier Marge Design

**Illustrations**

Arthur Bonifay  
*p. 20-21, 46-47, 72-77*

André Derainne  
*p. 13, 15, 18, 19, 23, 33, 34, 35, 37*

**Replay**

La rédaction

**Dicton**

Amaya Renaudin

**Dossier**

*Société*

Pilotes scientifiques:  
Véronique Bellon-Maurel,  
Xavier Reboud,  
Thierry Caquet,  
Christian Huyghe

Conception-rédaction:

Sophie Nicaud,  
Philippe Fontaine,  
Nicole Ladet,  
Aliette Maillard

**Dossier**

*Décryptage*

Pilotes scientifiques:  
Marie-Christine Champomier-Vergès,  
Sylvie Dequin,  
Lionel Bretillon,  
Catherine Renard,  
Monique Axelos

Conception-rédaction:

Élodie Régnier

**Dossier**

*Futurs*

Pilotes scientifiques:  
Michael O'Donohue,  
Monique Axelos

Conception-rédaction:

Sarah-Louise Filleux,  
Yann Chavance,  
Pierre-Yves Lerayer

Contributeurs:

Véronique Aigue,  
Johnny Beaugrand,  
Hélène Fulcrand,  
Philippe Gerardin,  
Jean-Denis Mathias,  
Virginie Vanderbossche

*Nous remercions tous les contributeurs et les personnes citées.*

**PORTFOLIO**

La recherche en images

[P. 1](#)

**ÉDITO**

*par la rédaction*

[P. 11](#)

**SOCIÉTÉ  
PENSER LE  
NUMÉRIQUE POUR  
UNE AGRICULTURE  
DURABLE**

[P. 12](#)

Une source de solutions

[P. 14](#)

**INFOGRAPHIE**

Le numérique sur le terrain

[P. 20](#)

Des acteurs plus proches, des territoires plus forts

[P. 22](#)

L'agroécologie comme cap

[P. 26](#)

Un accélérateur de transition sous conditions

[P. 32](#)

Le défi du déploiement à grande échelle

[P. 37](#)

**DÉCRYPTAGE  
LE POTENTIEL  
INSOUPÇONNÉ  
DES ALIMENTS  
FERMENTÉS**

[P. 44](#)

**INFOGRAPHIE**

Le processus de fermentation

[P. 46](#)

Manger fermenté, manger durable?

[P. 48](#)

Les 4 atouts des aliments fermentés

[P. 54](#)

**ENTRETIEN**

Marie-Christine Champomier-Vergès, directrice de recherche à l'unité Micalis à Jouy-en-Josas

[P. 59](#)

Un potentiel au service de la transition alimentaire

[P. 60](#)

**INTERVIEW CROISÉE**

Les industriels misent sur les aliments fermentés, rencontre avec Damien Paineau et Antoine Baule

[P. 64](#)

**FUTURS  
LE BIOSOURCÉ  
VA-T-IL VERDIR  
LE BÂTIMENT ?**

[P. 66](#)

La promesse des matériaux biosourcés

[P. 68](#)

**INFOGRAPHIE**

9 matériaux biosourcés pour bâtir demain

[P. 72](#)

Les conditions de la durabilité

[P. 78](#)

Les ressources sont-elles suffisantes?

[P. 82](#)

**REPLAY**

[P. 86](#)

ET AUSSI / POUR ALLER + LOIN

[P. 90](#)

LE DICTON DE SAISON

[P. 92](#)





# Penser les futurs

Le numérique bouleverse les systèmes agricoles et alimentaires, comme les autres secteurs. À l'heure d'une accélération des progrès technologiques sans précédent, les orientations de recherche sur ces sujets seront déterminantes. Nous vous présentons dans le dossier *Société* la vision d'INRAE sur le numérique à privilégier pour servir la transition vers des agricultures saines, productives et durables.

Si les technologies évoluent sans cesse, le procédé qui va révolutionner nos assiettes est quant à lui ancestral : la fermentation. Garante de la conservation de nos aliments depuis des millénaires, elle représente une véritable opportunité pour renouveler les régimes occidentaux d'aujourd'hui. Avec un bénéfice pour notre santé ? *Décryptage* vous dit tout des dernières recherches sur un art à cultiver.

Enfin, entre progrès technologique et ressources naturelles, les matériaux biosourcés sont considérés comme une voie majeure pour la réduction de nos émissions de CO<sub>2</sub>. Valorisables dans de multiples secteurs industriels, *Futurs* vous invite à en découvrir les atouts et les contraintes pour le domaine du bâtiment, responsable de 37% des émissions de CO<sub>2</sub> mondiales.

Vous avez été nombreux à nous faire savoir votre intérêt pour ce nouveau média de partage des connaissances scientifiques qu'est *Ressources*. Nous vous en remercions. Il est important pour nous d'en rendre le contenu accessible à tous, c'est pourquoi vous le trouverez sur notre site internet. Mais nous sommes heureux aussi de vous proposer désormais d'en acquérir la version papier, pour 12 €, dans votre librairie ou via le site de notre éditeur QUÆ. Vous pouvez aussi l'offrir et participer ainsi avec nous à la diffusion des savoirs.

Bonne lecture !



Régulation

**Introduction de l'hyménoptère parasitoïde *Mastrus ridens* en France dans le cadre de la lutte biologique contre le carpocapse du pommier.** Institut Sophia Agrobiotech rattaché au centre INRAE Provence-Alpes-Côte d'Azur  
© INRAE – Xavier Fauvergue

# PENSER LE NUMÉRIQUE POUR UNE AGRICULTURE DURABLE

Les technologies numériques ont ouvert un champ d'application immense dans tous les domaines d'activité. Présentes depuis plusieurs décennies dans l'agriculture et dans toute la chaîne de l'alimentation, leur développement s'accélère. Il invite les acteurs du secteur à s'interroger sur les futurs désirés et les orientations numériques à prendre pour les servir. Présentation des réponses d'INRAE pour un numérique levier des agricultures durables.

Le numérique lié à la production et à l'usage des données massives de génomique et de phénotypage ne sera pas traité dans ce dossier; il est toutefois reconnu pour son impact direct et fort sur les choix et activités des agriculteurs. De même, les nombreuses bases de données publiques sur l'agriculture, l'alimentation et l'environnement et leur utilisation ne seront pas abordées dans ce dossier.





# UNE SOURCE DE SOLUTIONS

Capteurs embarqués sur les agroéquipements, offres de systèmes d'imagerie, logiciels « outils d'aide à la décision » (OAD), robots, plateformes d'échanges et outils de connectivité font partie du quotidien des agriculteurs et agricultrices. Et ce de façon plus intense depuis une dizaine d'années. Quels sont les piliers de ce numérique développé à grande vitesse ?

## État des lieux.

Producteur aux prises avec les aléas climatiques et du vivant, mais aussi gestionnaire, commerçant, l'agriculteur s'appuie depuis toujours sur des outils pour assurer ses activités. Utilisateur de la mécanisation puis de la chimie au siècle dernier pour augmenter les volumes de production et le soulager des tâches pénibles, il a intégré dès les années 1980 les bénéfices de l'informatique, avec la bioinformatique et les nouveaux outils de la sélection des variétés ou races, puis la robotique (robot de traite par exemple). Depuis les années 2010, le numérique est de plus en plus présent dans les exploitations. Les capteurs ont décuplé les capacités d'observation au service d'une meilleure connaissance des agroécosystèmes. Le traitement de ces connaissances a amené le développement de logiciels de recommandation d'actions ou OAD. Parfois réalisées par des robots ou des systèmes automatisés, les actions peuvent être très précises pour apporter la bonne dose (d'eau, d'engrais, de produit phytosanitaire, de nourriture...) au bon endroit, au bon moment. Source de gain de productivité, le numérique et ses outils peuvent également réduire l'impact des systèmes agricoles sur l'environnement. Un potentiel que



EN FRANCE

70 %

des nouvelles installations en élevage sont équipées en robots de traite

10 %

taux d'équipement global, soit environ 10 000 robots

l'intelligence artificielle décuple et qui est aujourd'hui largement mis au service d'une agriculture de précision dédiée à la performance économique et à l'intensification durable.

### Des robots pour traire, biner, désherber, semer, pulvériser

D'abord développés dans les bâtiments pour l'élevage, les robots y apportent une multiplicité de services (traite, alimentation, raclage des étables). Premiers à être entrés dans le paysage agricole dès 1992, les robots de traite équipent désormais 70 % des nouvelles installations en élevage, amenant à un taux d'équipement global de 10 % aujourd'hui, soit environ 10 000 robots.

Le grand enjeu pour l'agriculture est désormais de bénéficier de robots en extérieur. En effet, si la robotique s'est beaucoup développée dans l'industrie, les capacités d'adaptation et de navigation de ces automates aux champs posent problème. Comment rendre fonctionnels les « robots d'intérieur » sur terrain accidenté, poussiéreux et soumis à des aléas climatiques de plus en plus imprévisibles ? En 2014, INRAE (à l'époque Irstea) présentait au SIMA<sup>1</sup> Baudetrob, le robot suiveur-



porteur. Dirigé par Lidar, il suit l'agriculteur dans les champs et permet ainsi au maraîcher ou au vendangeur de réaliser sa récolte sans avoir à en supporter le poids. Financé par l'ANR, un autre projet vise plus loin. Son nom ? Adap2E<sup>2</sup>. Prototype de recherche, il développe une multiplicité de comportements robotiques rendant possibles les actions de cartographier une parcelle, traiter des cultures, désherber, semer ou pulvériser. Grâce à l'interprétation des données captées, le robot peut s'adapter en fonction de l'état de la culture observée et de l'opération attendue. Il peut identifier des zones de traitement prioritaire et agir en temps réel. Il est testé actuellement pour la pulvérisation de produits phytosanitaires dans les vignes.

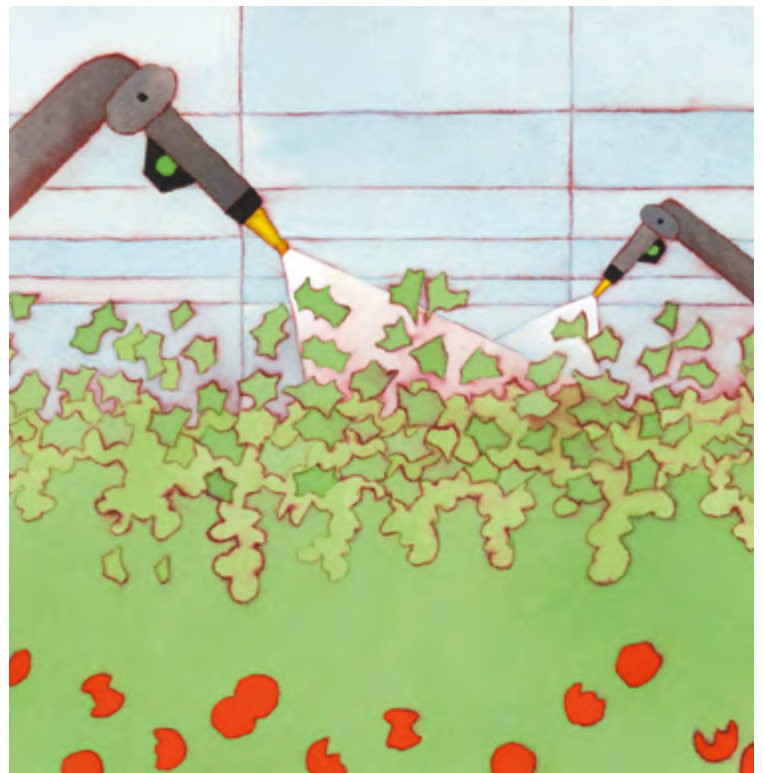
Premier producteur mondial, la société française Naïo commercialise les robots Oz, Orio, Ted et Jo pour biner, désherber, tracer des sillons, semer ou porter les récoltes en autonomie. Proposés à partir de 25 000 €, ces robots sont aussi accessibles en leasing. L'achat en coopérative en facilite encore l'accès. Et désormais, au regard du coût de main-d'œuvre économisé, l'investissement devient envisageable<sup>3</sup>. En France, en 2021, plusieurs centaines de robots<sup>4</sup> étaient déployés, essentiellement en maraîchage et viticulture. 60 % d'entre eux sont utilisés en agriculture biologique.

#### Des données de plus en plus nombreuses pour des modèles toujours plus précis

Les agroécosystèmes sont complexes car composés d'une diversité d'entités : plantes, animaux, microorganismes, etc. Leurs fonctionnements restent mal connus, particulièrement les processus dits associés tels que le flux d'eau ou le cycle des nutriments. Par ailleurs, depuis la fin de la Seconde Guerre mondiale certaines exploitations agricoles se sont largement agrandies tandis que le nombre d'agriculteurs n'a cessé de baisser. Ces éléments appellent de nouveaux systèmes de

**60 %**  
des robots  
« extérieurs »  
sont utilisés  
en agriculture  
biologique

suivi et de surveillance pour pallier une main-d'œuvre réduite. Heureusement, les capteurs sont là et ils sont nombreux et diversifiés. Fixes, comme les pièges, les objets connectés ou les stations météo, embarqués sur des machines agricoles ou bien portés par des animaux, hommes ou engins, comme un capteur d'activité ou de géolocalisation, ils transmettent des flux d'informations, stockées et traitées par calcul ou par des algorithmes d'intelligence artificielle. Ces informations deviennent, ainsi transformées, des connaissances et font avancer la compréhension des systèmes. L'invisible devient visible, de plus en plus précisément. Des modèles sont élaborés, de croissance des plantes ou de comportements des animaux par exemple, donnant vie à des logiciels de prévision, de détection et de recommandation d'actions. Les premiers OAD, logiciels de recommandation d'actions basés sur la modélisation, sont ainsi apparus dans les années 1980. Précieux pour un bon pilotage des exploitations, les outils numériques détectent les stress hydriques, certaines maladies, évaluent une concentration en carbone →



**Avec le numérique, l'invisible devient visible, de plus en plus précisément.**

ou en azote dans le sol, etc. Ils fournissent des recommandations pour la planification des parcours culturels, des traitements, du désherbage, le ciblage de l'irrigation... Certains logiciels conçus par INRAE sont des références, notamment ceux qui concernent la lutte contre les agresseurs ou Optirrig pour l'irrigation. De très nombreux logiciels ont également été développés par les instituts techniques agricoles en réponse aux besoins des agriculteurs.

Ces dernières années, une nouvelle génération d'OAD a émergé, qui utilisent la télédétection par satellite, le géopositionnement ou internet pour une information plus fine encore. Les drones peuvent aussi remplacer ou compléter les images satellitaires. Ainsi, la start-up Hiphén, née dans le giron de l'UMR EMMAH à INRAE Provence-Alpes-Côte d'Azur, qui travaille sur le phénotypage des plantes, utilise les technologies d'imagerie des cultures, du capteur connecté au satellite en passant par le drone, avec des données accessibles par téléphone portable. Ces outils apportent une efficacité inégalée. Sur le blé, par exemple, l'imagerie sur les zones d'expérimentation remplace les comptages fastidieux d'épis et les mesures de largeur de feuille qui, auparavant, étaient réalisés à la main.

La modélisation doit s'adapter pour tenir compte du caractère multiobjectif de la production, et pour aider à la décision, sans forcément la rem-

**Avec la massification des données, de nouvelles technologies de traitement sont développées. L'IA permet aujourd'hui de créer des connaissances originales à partir de ces données massives.**

placer, en fournissant à l'utilisateur différents types d'informations, un diagnostic, une prévision, une prescription. Elle peut être utilisée pour les OAD mais aussi en accompagnement de décisions collectives, pour la formation, etc.

#### **La puissance de l'intelligence artificielle**

Avec la massification des données, de nouvelles technologies de traitement sont développées. L'intelligence artificielle (IA) permet aujourd'hui de créer des connaissances originales à partir de ces données massives. Suffisamment nombreuses pour couvrir l'espace des possibles, celles-ci sont curées puis traitées pour prédire des valeurs ou réaliser des classifications pour les premières et simplement distinguer des motifs (patterns) pour les secondes. Les technologies de deep learning (ou apprentissage profond) et de machine learning (ou apprentissage automatique) sont utilisées pour le traitement des images complexes, d'images satellites ou encore de séries temporelles (par exemple, des mesures d'un paramètre réalisées de manière continue ou répétée sur un temps long). Les techniques de text mining (fouille de données textuelles) sont utilisées pour retrouver des informations dans les données issues d'internet. Ainsi, la plateforme Padi-web<sup>5</sup> du projet européen MOOD développée à l'UMR TETIS met en œuvre la fouille de données sur des textes disponibles sur internet et les réseaux sociaux (Facebook, Twitter) pour détecter précocement l'émergence de maladies animales.

Un des objectifs de la recherche est également de rendre ces nouvelles connaissances exploitables, en particulier en travaillant sur les vocabulaires et le web sémantique. Grâce à ces technologies, le sur-mesure est envisageable, même à grande échelle.

#### **Une connectivité qui rapproche**

Les échanges entre producteurs, transformateurs, distributeurs et consommateurs se font de plus en plus virtuels et rapides tout au long de la chaîne. La connectivité et les systèmes d'information sont au centre des activités industrielles, logistique comprise.

Technophiles, les agriculteurs sont connectés. En 2022, 98% des agriculteurs possèdent un ordinateur<sup>6</sup>, 80% un smartphone. Ils se connectent au moins une fois par jour, pour accéder à une



## Adeptes des réseaux sociaux, les agriculteurs participent à de multiples communautés, soit pour échanger des informations, soit pour construire des dispositifs partagés.

information, prioritairement la météo mais aussi sur les nouvelles pratiques ou technologies, ou bien encore l'économie et les marchés. Adeptes des réseaux sociaux, en particulier YouTube, Facebook et WhatsApp, ils participent à de multiples communautés, soit pour des échanges d'information, soit pour construire des dispositifs partagés d'information (météo ou pression parasitaire par exemple). 31% se disent hyperconnectés. Certains d'entre eux dépassent leur communauté de métier pour montrer, sur Twitter et d'autres réseaux, leurs pratiques, leurs contraintes, et donner une image plus réaliste et positive de leur métier.

En forte progression depuis le confinement, les plateformes de distribution des produits alimentaires peuvent être portées par des distributeurs nationaux, à l'instar de l'émergence rapide du nouvel acteur « Grand frais ». Des initiatives plus locales, individuelles ou de collectifs, rapprochent le consommateur du producteur. Ainsi, La Ruche qui dit oui a pris des allures de start-up, augmentant de façon très forte son activité, de même de nombreuses initiatives « frais et local » de collectivités invitées à s'impliquer dans la territorialisation de l'alimentation par la loi Egalim (voir p. 23) ont vu le jour. Après avoir observé une progression de ces plateformes lors des confinements successifs, l'Observatoire ObsSAT<sup>7</sup> animé par le réseau mixte technologique (RMT) « Alimentation

  
**98 %**  
des agriculteurs possèdent un ordinateur

  
**80 %**  
des agriculteurs possèdent un smartphone

  
**68 %**  
sont sur au moins un réseau social

  
**57 %**  
sur YouTube

  
**54 %**  
sur Facebook

  
**51 %**  
sur WhatsApp

Source : Étude Agrinautes 2022 France  
[bit.ly/3gajWkt](https://bit.ly/3gajWkt)

locale » souligne depuis un fléchissement, dû souvent à un modèle économique pas assez travaillé.

Aujourd'hui, le numérique peut servir tous les types d'exploitation, en conventionnel comme en agriculture biologique, grosses comme petites, même si historiquement c'est plutôt l'agriculture de grande taille et intensive qui a été la première concernée. Au-delà des pratiques agricoles et des performances individuelles, en rendant disponibles de nouvelles informations dans les chaînes de valeurs et en facilitant certaines connexions, le numérique modifie les rapports de force entre les acteurs de toute la filière et l'organisation de la chaîne de valeur de l'alimentation tout en réduisant les asymétries d'information. ●

1. Salon international des solutions et technologies pour une agriculture performante et durable. [simaonline.com](https://simaonline.com)

2. La plateforme de production adaptative et autonome pour l'environnement (Adap2E) est un projet Jeunes chercheurs, porté par l'unité de recherche INRAE TSCF avec l'apport de l'UMR ITAP.

3. [bit.ly/3Sedx54](https://bit.ly/3Sedx54)

4. [bit.ly/3TsTwc7](https://bit.ly/3TsTwc7)

5. <https://agritrop.cirad.fr/594604/>

6. [bit.ly/3gajWkt](https://bit.ly/3gajWkt)

7. Le RMT « Alimentation locale » dont INRAE est coanimateur, a créé l'Observatoire des systèmes alimentaires territorialisés (ObsSAT) avec la fédération des Centres d'initiatives pour valoriser l'agriculture et le milieu rural (CIVAM) de Bretagne. [www.rmt-alimentation-locale.org](https://www.rmt-alimentation-locale.org)

# CONCRÈTEMENT

## LES OUTILS NUMÉRIQUES ACCOMPAGNENT LA PRODUCTION ALIMENTAIRE ET LA GESTION ENVIRONNEMENTALE : EXEMPLES

### Élevage Prévenir plutôt que guérir

Depuis les années 2000, un suivi individualisé des animaux est possible. Nathalie Mitton, chercheuse à l'Inria et co-auteurice du livre blanc *Agriculture et numérique*<sup>1</sup>, donne un exemple : « *Un de nos doctorants a fondé une start-up, Lituus. Elle fabrique des colliers pour détecter si les vaches vont bien. Les comportements normaux (chaleur, vêlage) et anormaux (boiterie, trouble du comportement) définis par les éleveurs sont paramétrés dans l'outil. Les informations remontent par les capteurs et sont*

*analysées par intelligence artificielle. En cas de souci, une alarme est déclenchée, évitant à l'agriculteur d'aller deux fois par jour scruter l'état de santé de son troupeau. Surtout, cela lui permet de réagir dès les premiers signes pour soigner sa bête. C'est une avancée en matière de bien-être animal, de baisse de pénibilité et charge mentale pour l'éleveur* ». Dans le même esprit, grâce au machine learning et à des capteurs embarqués sur des vaches laitières, Nicolas Wagner a mis au point une nouvelle méthode informatique durant sa thèse. Elle permet de limiter les fausses alertes et une détection des anomalies souvent un voire deux jours avant les premiers symptômes observés par l'éleveur.



### Pollinisation et biodiversité Suivre les abeilles

Le suivi des abeilles est essentiel pour l'apiculteur afin de s'assurer de leur productivité et de la présence de ressources à butiner. Cependant, multiplier les visites génère des coûts et constitue un facteur de stress pour les insectes. Sur la base des travaux d'INRAE (projet Beelive<sup>2</sup>), la société BeeGuard propose depuis 2016 des systèmes de suivi des ruches et du comportement des pollinisateurs. Ainsi, à partir de mouchards posés sur les abeilles et d'autres capteurs, les apiculteurs surveillent sans intervention le bon fonctionnement de la ruche à partir d'indicateurs de température, d'humidité ou de taux de retour à la ruche. L'analyse des entrées et sorties d'abeilles leur indique si la zone extérieure présente assez de ressources ou s'il se produit une surmortalité d'origine inconnue. La ruche ainsi équipée devient une sentinelle de la qualité de l'environnement.

1. [url.inrae.fr/3HBktEe](http://url.inrae.fr/3HBktEe)

2. « Détection des modifications de l'organisation circadienne des activités des animaux en relation avec des états pré-pathologiques, un stress, ou un événement de reproduction », 2020.

3. Projet primé aux SIMA Innovation Awards 2022.

4. Dispositif institutionnel national d'approvisionnement mutualisé en imagerie satellitaire.

5. HubAlim : plateforme BtoB de données agroalimentaires.

6. Num'Alim : plateforme de données sur les produits agroalimentaires transformés pour des applications consommateurs.

7. Yuka est une application mobile qui, à partir du code-barres d'un produit commercialisé, scanne les étiquettes et les déchiffre pour identifier les produits mauvais pour votre santé.



## Cultures

### Repérer le mildiou par drone

La détection précoce de maladies et la géolocalisation précise des plantes infectées contribuent à un traitement optimisé des cultures et surtout à une réduction de l'usage de produits phytopharmaceutiques.

À l'échelle des exploitations, des logiciels de reconnaissance de maladies ou de stress hydrique sont développés. La société bordelaise Chouette a, par exemple, développé un logiciel de détection des premiers symptômes du mildiou sur les feuilles de vigne, sur le même principe que la reconnaissance faciale. Le drone qui embarque la caméra de détection couplée au géopositionnement fournit au viticulteur une carte avec une localisation précise des plants infectés. Celui-ci pourra intervenir précocement et uniquement sur la zone infectée. Ce système lui permettra d'endiguer la propagation de la maladie en agissant plus tôt, et de réduire sa consommation en produits phytopharmaceutiques en agissant très localement.

## Une nouvelle méthode informatique détecte 90 à 100 % des anomalies dues à un problème de santé chez une vache.

## Aménagement

### Des satellites au service de la gestion environnementale



La plateforme DINAMIS<sup>4</sup> réunissant des acteurs publics et privés de la recherche et de l'industrie (CNES, CNRS, IGN, INRAE, IRD, Cirad, Airbus...) donne accès à un bouquet d'images commerciales de données optiques à très haute résolution spatiale et un relais vers des données optiques gratuites et radar à haute résolution spatiale à partir d'images Pléiades, SPOT 6-7 et bientôt Sentinel 2. Avec ces images d'une précision allant jusqu'à 50 cm, le traitement des données permet un suivi des parcelles agricoles (occupation des sols, types d'activité, étape de la croissance, zones malades...) ou boisées (espèces, coupes, dégâts sanitaires...), ainsi que des eaux superficielles. Ces informations sont précieuses pour les politiques d'aménagement ou de planification territoriale, de suivi ou de gestion environnementale.

## Traçabilité

### Des bases de données pour les labels

La production agricole et alimentaire engendre une masse d'informations nouvelle: origine, date de péremption, composition ou encore temps de pâturage que seul le numérique est en mesure de traiter, d'analyser et de restituer. La transmission des informations suit le processus de production tout au long de la chaîne pour arriver au consommateur, servant chaque étape et alimentant les bases de données des systèmes de notation comme Nutriscore ou Eco-score ou les systèmes de qualité AOC/AOP, IGP ou le label AB aux cahiers des charges exigeants. En France, deux plateformes servent de bases de données nationales. HubAlim<sup>5</sup> trace les données sur les produits provenant de

l'agriculture tandis que Num'Alim<sup>6</sup> regroupe les fiches des produits alimentaires transformés par les industriels auxquelles sont ajoutées les informations concernant la responsabilité sociale et environnementale des entreprises. Les applications comme Yuka<sup>7</sup> viennent se sourcer sur leur référentiel, Univers'alim, qui regroupe plus de 250 000 produits alimentaires vendus en France. Ces données s'affichent sur les emballages ou les sites d'e-commerce alimentaire.



# Le numérique sur le terrain

Améliorer la production, assurer la traçabilité des produits, réduire la pénibilité : le numérique est au cœur de l'agriculture.

❶ Les satellites assurent à la fois la transmission des données et le suivi des parcelles. Ils renseignent sur le rendement des cultures, l'occupation des sols, les stades de croissance...

❷ Des colliers émetteurs permettent aux vaches de se déplacer librement entre l'étable, la salle de traite et la pâture. Ils transmettent les informations sur les comportements des animaux.

❸ En plus de la traite automatique, le robot analyse le lait. Taux de protéines, densité, présence d'antibiotiques ou de parasites : ces données sont transmises directement à l'éleveur via un serveur.

❹ Quota de lait produit, événement vétérinaire, nombre de vaches en gestion, suivi des stocks de fourrage, l'éleveur gère son exploitation avec l'ensemble de ces données reçues.

❺ La station météo mesure l'hygrométrie de l'air, la température, la force du vent. Ces indicateurs sont déterminants pour la croissance des prairies et cultures.

❻ À partir de la couleur des feuilles, le robot identifie si la vigne est malade puis pulvérise un traitement localisé.





**7** En maraîchage, le robot suiveur accompagne le producteur dans sa récolte, diminuant ainsi la pénibilité du travail.

**8** Les drones, munis de caméras ou de capteurs thermiques, survolent les parcelles et transmettent des données sur l'état des sols et des cultures.

**9** Les données transmises via les réseaux mobiles satellitaires ou les ondes radios hertziennes en zone blanche à l'agriculteur lui permettent d'évaluer son rendement, de l'alerter en cas de prévision météo orageuse, de le renseigner sur l'état hydrique des sols...

**10** Les silos à grain connectés permettent de piloter les critères d'humidité et de température à distance pour prévenir la moisissure des graines et éviter 10 % de gaspillage.

**11** Des pièges connectés installés dans les vergers sont capables d'identifier un insecte ravageur et de lancer une alerte au producteur et aussi de renseigner la plateforme d'épidémiosurveillance nationale.

**12** Les données sur l'origine, le mode de production, la transformation des aliments assure leur traçabilité du producteur au consommateur, pour tous les types de ventes : à la ferme, en amap ou dans les magasins, via les étiquettes et des applications, telle Yuka.



# DES ACTEURS PLUS PROCHES, DES TERRITOIRES PLUS FORTS

Le numérique change les modes de communication, fait émerger de nouveaux acteurs, reconfigure les réseaux et restructure le paysage économique. En agroalimentaire, il renforce le rôle du consommateur et crée de la valeur au service du collectif.

## Explications.

Les consommateurs privilégient depuis plusieurs décennies le « facile à préparer ». La transformation a pris le pas sur les produits bruts, intégrant conservateurs et additifs. L'industrialisation et la mondialisation des échanges ont éloigné les producteurs des consommateurs. Dans des pays fortement urbanisés comme la France, le rapport des citoyens à leur alimentation et à l'agriculture a été profondément modifié. À la faveur de crises répétées, une certaine méfiance s'est installée.

Les questions environnementales qui s'imposent en parallèle soulignent combien l'agriculture peut être à la fois responsable et victime d'un environnement dégradé mais, fort heureusement, aussi source de solutions. Dans ce contexte tendu qui interroge les pratiques, le numérique bouleverse les relations entre les acteurs par la désintermédiation et le renforcement des relations directes entre consommateurs et agriculteurs, apportant ainsi des nouveaux outils de confiance et documentant la gestion collective de l'environnement.

### Créateur de nouvelles chaînes de valeur

Commandes et livraisons en ligne, via les sites des grands distributeurs ou de vente directe, la Ruche qui dit oui, Locavor... les plateformes sont ancrées

dans notre quotidien. Selon Isabelle Piot-Lepetit, directrice scientifique de l'institut Convergences agriculture numérique #DigitAg: « *Les chaînes de valeur, définies par l'ensemble des acteurs allant de la fourche à la fourchette, se reconfigurent avec le numérique. La rupture vient du fait que nous passons d'une chaîne à un réseau multidirectionnel. L'agriculteur peut approvisionner à la fois les grandes surfaces, des magasins spécialisés ou des particuliers. Avec les plateformes, certains intermédiaires peuvent disparaître, dans l'intérêt du consommateur comme du producteur* ». Ainsi, la plateforme peut offrir de vraies opportunités aux agriculteurs pour trouver et fidéliser des clients sensibles à leurs démarches. En bout de chaîne, elle facilite le choix du consommateur, mieux informé sur les modes de production.

Répondant à une attente sociétale forte, la traçabilité pour l'alimentation humaine et animale est obligatoire depuis 2002. Les « beaux récits » sur l'origine des produits, leur composition et leur mode de production se multiplient, les labels aussi, jusqu'à entretenir une certaine confusion. En renforçant la confiance, cette traçabilité donne aussi un nouveau pouvoir au consommateur, mieux informé. En choisissant un mode de production, en plein air, biologique, un mode de



distribution optimisé, un effort sur l'impact environnemental ou sur la rémunération des agriculteurs, le consommateur influe sur le système. « Nous avons alors une chaîne inversée où le consommateur prend les commandes. Par exemple, dans l'initiative "C'est qui le patron?!", tous les produits sont créés, sélectionnés mais aussi vérifiés par les consommateurs membres du collectif. Le consommateur devient de plus en plus acteur dans cette nouvelle chaîne de valeur », précise Isabelle Piot-Lepetit.

L'Observatoire des systèmes alimentaires territoriaux (ObsSAT), dans son analyse des plateformes d'alimentation locale constatait : « sur les 100 plateformes étudiées, celles qui donnent la place à l'agriculteur en informant sur ses pratiques, en lui donnant la parole ont été plus résilientes lorsque l'activité a baissé après les confinements ».

#### Un outil pour la territorialisation de l'alimentation

Le numérique permet aussi d'organiser plus efficacement les filières au sein de chaque territoire agricole et entre territoires. À commencer par les pratiques agricoles qui se pensent désormais au-delà de la parcelle. Leur grande connectivité permet aux agriculteurs de mieux se coordonner afin de minimiser les risques. Ainsi par exemple, la synchronisation des dates d'implantation du tournesol permet de minimiser, en les partageant, les dégâts des corvidés consommant les semis. Les projets alimentaires territoriaux (PAT) ont pour objectif de relocaliser l'agriculture et l'alimentation dans les territoires en soutenant l'installation d'agriculteurs, les circuits courts ou les produits locaux dans les cantines. Issus de la Loi d'avenir pour l'agriculture qui encourage leur développement depuis 2014, ils sont élaborés de manière collective à l'initiative des acteurs d'un territoire (collectivités, entreprises agricoles et agroalimentaires, artisans, citoyens, etc.) en s'appuyant toujours sur le numérique.

« Avec la loi Egalim 2, la territorialisation s'est accrue. En effet, pour la restauration collective, les collectivités doivent fournir 50 % de produits durables et de qualité dont 20 % issus de l'agriculture biologique. Comment assurer un approvisionnement continu? Ce sont des quantités énormes : la Région Occitanie, par exemple, doit gérer 40 millions de repas en restauration scolaire par an. Pour répondre à la demande, il y a deux solutions, soit s'appuyer sur de grandes fermes intégrées, soit

agrégier les productions des structures maraîchères de plus petite taille, mais il faut alors planifier l'ensemble des productions et gérer la logistique. L'entreprise Bonduelle le pratique pour l'approvisionnement de ses usines avec des agriculteurs sous contrat. Une thèse est en cours sur la planification et l'optimisation des rotations de cultures maraîchères à l'échelle de la ferme et pourrait ouvrir la voie à des échelles plus grandes », explique Véronique Bellon-Maurel, directrice de #DigitAg. De son côté, Montpellier Méditerranée Métropole s'est engagée pour l'agroécologie. Labellisée Marché d'intérêt national (MIN), la plateforme Mercadis met en relation acheteurs professionnels et producteurs. Elle favorise les circuits courts, encourage les productions respectueuses de l'environnement, et relocalise les productions agricoles et l'alimentation avec un « carreau Bio & local » notamment. Plus encore, elle lutte contre la précarité alimentaire, en facilitant l'accès des associations d'aide alimentaire aux produits frais des producteurs locaux et, en affiliant le MIN à la centrale de règlement des titres. Les flux logistiques sont réduits grâce au numérique. Dans la →



## FUTUR

### Quel scénario pour notre alimentation demain ?

Une prospective<sup>1</sup> menée par INRAE et Grenoble INP a envisagé les futurs possibles des marchés alimentaires, sur un horizon à 20 ans. En fonction des stratégies des différents acteurs, 4 scénarios ont été étudiés. Dans le premier, « Personnalisation », les désirs des consommateurs sont anticipés autant que possible, donnant la main aux géants du web, les GAFAM. Dans le scénario 2, « Engagement », la gestion des biens communs et la rémunération des agriculteurs sont au cœur des attentions des consommateurs, qui s'expriment via les plateformes, et des politiques publiques renforcées. Le scénario 3, « Communautés », aboutit à un archipel de modèles alimentaires contrastés et incompatibles. Quant au dernier, « Prix bas », il engendre une baisse de qualité de produits et de rémunération pour les agriculteurs au terme d'une concurrence exacerbée des plateformes. Bernard Ruffieux, le pilote de l'étude, conclut : « L'e-commerce et la logistique de proximité sont là. Mais l'avenir qui se dessine avec n'est pas encore joué. Si les grandes plateformes comme Amazon et les opérateurs historiques sont en pleine révision de leurs modèles économiques, les consommateurs et les politiques publiques auront aussi leur carte à jouer ».

## ENJEU

### Sécuriser la traçabilité des aliments

Du suivi au rappel éventuel, la traçabilité des produits alimentaires est un enjeu de sécurité sanitaire. Garantir la qualité des données est essentiel, assurer la fiabilité des échanges et des flux aussi. Plébiscitées par les consommateurs, les données liées aux aliments sont nombreuses : origine, date limite d'utilisation optimale, composition ou même pour la viande ou les produits laitiers le temps de pâturage des animaux... Seul le numérique est en mesure de traiter, d'analyser et de restituer l'ensemble de ces données. La transmission des informations suit le processus de production tout au long de la chaîne pour arriver au consommateur, alimentant in fine les bases de données des systèmes de notation. Le numérique permet même de suivre et analyser le comportement des consommateurs en réponse à ces différentes informations.

Mais comment s'assurer de la fiabilité de systèmes qui agrègent un grand nombre de données issues d'un océan d'acteurs ? Jérôme François, directeur de Num'Alim, explique : « *Aujourd'hui, les données fournies par les fabricants ont un taux d'erreur compris entre 30 à 50 %. Si la majeure partie des erreurs concerne une virgule manquante ou une inversion entre kilocalories et kilojoules, il peut arriver que des allergènes soient mal renseignés. Et là, en exposant les consommateurs via les sites de e-commerce ou les applications, les entreprises jouent avec le feu. C'est pourquoi notre société coopérative d'intérêt collectif, qui rassemble des entreprises agroalimentaires, des*

*associations de consommateurs et des acteurs publics, fournit à ses adhérents des outils de fiabilisation des données via notre partenaire Consotrust et notamment grâce au machine learning qui débusque les erreurs dès la saisie ».*

Afin de baisser le taux d'erreur des données, un des enjeux de la recherche est de développer des technologies d'acquisition avec moins d'interventions humaines. Ainsi par exemple, dans le cadre de travaux interdisciplinaires développés à l'institut Convergence agriculture numérique<sup>2</sup> #DigitAg, un post-doctorant explore le potentiel d'une étiquette RFID-capteur qui trace le produit et mesure en même temps la dégradation des aliments<sup>3</sup>. Depuis quelques années, un outil fait la une des journaux, la blockchain. Conçue à l'origine pour sécuriser les transactions en cryptomonnaie, elle répond parfaitement aux enjeux de chaînes multiacteurs et multifilières à la maturité et aux besoins très différents. Dans une base de données partagée par l'ensemble de ses utilisateurs, les informations sont regroupées au sein de blocs. Pour qu'un bloc soit ajouté à la blockchain, un mécanisme algorithmique complexe de validation impliquant des utilisateurs est mis en œuvre. Lorsqu'il est validé, le bloc est ajouté à la chaîne et ne peut plus être modifié. Ceci empêche un acteur de modifier une donnée unilatéralement. Si la blockchain est une des solutions pour fiabiliser des systèmes d'information, elle peut être très énergivore quand elle est utilisée sur des systèmes ouverts à un large public.



démarche « BoCal, Bon et Local », le site internet [bocal.montpellier3m.fr](http://bocal.montpellier3m.fr) met en visibilité les circuits courts pour les consommateurs. Cette politique pour une alimentation durable de la collectivité est construite avec les associations, les agriculteurs, la communauté scientifique et les consommateurs montpelliérains.

Dans son appui aux producteurs, collectivités ou autres intermédiaires dans leurs projets de circuits courts, l'ObSAT fournit des données fiables sur la production, la transformation et la logistique de distribution en circuits courts. Celles-ci sont stockées et gérées dans une base de données ouverte (données librement utilisables par tous), agrégative (différentes sources de données) et participative (en partenariat avec la Chambre d'agriculture France et UFC Que choisir, association de consommateur).

#### Un facilitateur de la gestion collective

Le numérique peut aussi contribuer aux systèmes de surveillance et renforcer l'action publique.

En réponse aux crises sanitaires répétées, l'État français a mis en place en 2018 trois plateformes d'épidémiosurveillance (santé animale, santé végétale et chaîne alimentaire) dont la coordination a été confiée à la direction générale de l'alimentation du ministère de l'Agriculture, l'Anses et INRAE. Elles regroupent des informations pour optimiser les actions de surveillance. La collecte de données auprès des agriculteurs et industriels et le partage de ces informations permettent de détecter et localiser plus rapidement l'émergence de maladies ou la présence de ravageurs, parasites ou contaminants, et de gérer la crise directement sur sa zone de départ. La plateforme Padi-web propose le même service pour des maladies animales à partir de données collectées sur internet (projet MOOD – voir page 16).

L'eau, les sols et l'air sont des biens communs dont la qualité s'est détériorée sur les décennies passées. Des politiques publiques sont mises en place pour les améliorer ou les restaurer. Par la possibilité de recueillir des données de sources variées et en grand nombre mais aussi des méthodologies nouvelles de partage, de diagnostic et d'échange, le numérique permet l'évaluation des situations, la définition d'objectifs communs et la mise en place de stratégies partagées. Les outils numériques rendent ainsi possible une

1. Étude prospective « Quatre scénarios pour éclairer la distribution alimentaire du futur ». [INRAE 2022](#).

2. [www.hdigitag.fr](http://www.hdigitag.fr)

3. Ce capteur est un biopolymère qui réagit aux gaz émis (CO<sub>2</sub>, éthanol...) lors de la dégradation des aliments, placé sur la face interne de l'emballage, sous l'étiquette RFID. En cas de dégradation de l'aliment, les gaz émis modifient la réponse RFID. Ces recherches sont menées au sein de l'Institut électrique et des systèmes (UMR 5214) et du laboratoire d'Ingénierie des agropolymères et des technologies émergentes (INRAE/ université de Montpellier).

4. [bit.ly/3MDhcbw](http://bit.ly/3MDhcbw)

gestion collective à l'échelle des territoires avec la construction de consensus et de stratégies d'actions sur des biens utiles à tous et à préserver. Ils permettent de dépasser l'horizon de la parcelle ou de l'élevage pour intégrer une vision du territoire et mieux piloter l'impact de l'agriculture. Grâce à eux, les biens communs prennent une autre place. La télédétection peut aussi renforcer l'application des politiques nationales ou européennes. En cohérence avec le Green Deal<sup>4</sup>, ou Pacte vert européen, par lequel l'Europe a mis en priorité les enjeux écologiques et la santé, la Politique agricole commune conditionne désormais pour partie ses subventions aux agriculteurs selon leurs pratiques et leur impact sur l'environnement. Ainsi, l'écoringime conditionne sa subvention à la présence d'au moins 10 % de surface de haies ou bandes enherbées. Comment vérifier qu'un agriculteur donné a bien réalisé la plantation de haies déclarée ? Avec l'offre satellitaire proposée par le consortium DINAMIS, le suivi et le contrôle deviennent possibles et donnent de la force aux politiques mises en place.

En rapprochant producteur et consommateur, le numérique rend plus transparentes les réponses à la demande sociétale de naturalité et de pratiques plus respectueuses de l'environnement. En facilitant la gestion des territoires, il donne plus de poids au collectif et à l'action publique. Mais pour quel projet ? ●

**La grande connectivité des agriculteurs leur permet de mieux se coordonner afin de minimiser les risques.**

# L'AGROÉCOLOGIE COMME CAP

Préconisée par les scientifiques, reconnue par les experts, l'agroécologie est choisie aujourd'hui par certains pays, dont la France, et portée par l'Union Européenne. En quoi le numérique en est-il un des leviers ?

## Enjeux.

Le changement climatique, la dégradation des sols et la perte de biodiversité questionnent le secteur agricole. À ces pressions s'ajoutent une augmentation de la population mondiale et de la demande alimentaire, une main-d'œuvre agricole qui se raréfie et, dans les pays occidentaux, une demande sociétale de plus en plus forte pour des modes de production plus respectueux de l'environnement et de la santé, et ce sans que le pouvoir d'achat du consommateur ne soit grevé. Les deux dernières crises, Covid-19 et guerre en Ukraine, ont pointé du doigt la résilience mais aussi la vulnérabilité de notre agriculture et remis à l'agenda la problématique de la sécurité alimentaire. Face à ces multiples enjeux, l'agroécologie propose de mettre les écosystèmes au cœur des modèles de production, de reterritorialiser l'alimentation et de rééquilibrer la chaîne de valeur en faveur du producteur. Le numérique peut-il accélérer cette transition ? Certains voudraient opposer agroécologie et numérique. Au contraire, INRAE étudie et préconise leur mise en synergie pour aboutir à des systèmes agricoles et alimentaires sains et durables, tout en conservant l'autonomie de décision et d'action des agriculteurs. Le numérique émerge effectivement comme un levier de la tran-

1. Selon la définition du Comité de la sécurité alimentaire mondiale, « *La sécurité alimentaire existe lorsque tous les êtres humains ont, à tout moment, la possibilité physique, sociale et économique de se procurer une nourriture suffisante, saine et nutritive leur permettant de satisfaire leurs besoins et préférences alimentaires pour mener une vie saine et active* ». Cette définition a été adoptée par un consensus international lors du Sommet mondial de l'alimentation de 1996.

2. Rapport du High Level Panel of Experts (HLPE) – juillet 2019. [bit.ly/3C1F88J](https://bit.ly/3C1F88J)

sition agroécologique, pour soutenir et accélérer l'adoption de ce modèle. Comment ?

### Allier agronomie et écologie

Durable, vous avez dit durable ? Selon les Nations unies, la durabilité de l'alimentation passe avant tout par la sécurité alimentaire<sup>1</sup>, c'est-à-dire assurer une alimentation suffisante, saine et nutritive pour tous. Mais pas seulement. Elle vise également à être culturellement acceptable, économiquement équitable, accessible à tous et enfin impose une réduction du coût environnemental (cf. *Ressources* #1 p. 12). Pour diminuer cette empreinte environnementale et réduire les pertes et gaspillages, les systèmes agricoles comme les systèmes alimentaires doivent être repensés dans une approche globale et transversale, intégrant tous les maillons de la chaîne, des pratiques agricoles et industries de l'amont (semences, engrais, etc.) à la logistique et à la distribution en passant par les industries agroalimentaires qui transforment les produits. Deux modèles agricoles ont été préconisés par le HLPE<sup>2</sup> : l'intensification durable et l'agroécologie. C'est dans cette seconde voie, « en rupture » par rapport à l'agriculture conventionnelle, que s'est engagé INRAE. Un modèle soute-





© INRAE - Christophe Maître

nu par l'Europe et la France. Une pause définition s'impose. L'agroécologie, comme son nom l'indique, est un modèle qui allie agronomie et écologie. Elle s'appuie sur les fonctionnalités des écosystèmes et les amplifie pour générer des services de régulation, tout en limitant les pressions engendrées par l'activité humaine. Elle réduit les apports des intrants de synthèse (pesticides, engrais ou antibiotiques), s'appuie sur l'écologie et la biodiversité fonctionnelle, sur la sobriété et le respect du cycle des intrants naturels (eau, matière organique, nutriments). Elle limite ainsi la pollution des sols et des rivières, préserve les ressources et favorise leur renouvellement naturel. Elle œuvre pour le bien-être des animaux et favorise une meilleure place pour les agriculteurs et agricultrices (revenus, autonomie, maintien d'une agriculture familiale et d'emplois décents...). Selon Xavier Reboud, chargé de mission Agroécologie et numérique auprès de la direction scientifique Agriculture d'INRAE, « *l'agriculture évoluera, quoi qu'il arrive. Nous pouvons cependant nous servir du numérique pour accélérer la transformation. Développer l'agroécologie à grande échelle n'est pas aisé. Les agroécosystèmes y sont plus complexes. Ils nécessitent un pilotage fin et ajusté à la diversité des milieux*

↑  
**Mesure des paramètres climatiques, dont l'accès aux rayons du soleil, dans un champ agroforestier associant orge, folle avoine et noyer.**

*et des environnements. Or, nous manquons parfois de connaissances. Il faut apprendre à gérer les associations de cultures, mieux connaître le sol, les microclimats, l'abondance des auxiliaires ou des bioagresseurs... Et ça, c'est inconcevable sans l'appui des outils numériques ».*

Un enjeu pour la recherche à moyen terme sera aussi d'évaluer le potentiel des jumeaux numériques dans les exploitations agricoles pour accompagner la transition agroécologique. L'utilisation de jumeaux numériques dans les fermes signifie créer des représentations virtuelles d'actifs physiques – champs, animaux ou machines – qui peuvent être améliorées en exploitant les données des capteurs et des caméras sur le terrain, pour optimiser l'utilisation de l'eau, répandre correctement les semences et les engrais, réduire l'utilisation de pesticides ou encore suivre l'état de santé d'un troupeau.

**Mieux connaître les écosystèmes pour mieux les gérer**

Les écosystèmes sont des systèmes complexes. Interactions entre les organismes, impact de la biodiversité, capacités de résistance ou de résilience de certaines espèces face aux maladies et parasites ou aux aléas climatiques, propriétés des →



© Bertrand Nicolas / INRAE

sols, etc., autant de processus et de fonctions encore mal connus. Une meilleure connaissance de la biodiversité, des milieux et de leur fonctionnement s'impose afin de pouvoir reproduire voire piloter les processus favorables aux activités agricoles. Associations ou rotation de cultures, plantes de service, diversification des variétés ou des races, autant de leviers de l'agroécologie qui en sont directement inspirés, et pour lesquels le suivi précis requiert un grand nombre d'actions que le numérique aide à appréhender et à gérer. Les capteurs pour collecter les données de terrain et de comportement en grand nombre, les données massives de génomique, les capacités de traitement et de stockage des ordinateurs permettent de comprendre et modéliser les espèces, les cultures et les agroécosystèmes et de projeter leur comportement sous l'action de différentes contraintes ou orientations techniques.

Des logiciels de recommandation et de planification facilitent la conduite de systèmes complexes de cultures en intégrant la multiperformance dans leurs critères : rendement, qualité et impact environnemental.

Une prairie est aussi un bon exemple de système complexe avec la diversité des espèces qui peuvent

↑  
Évaluation  
de la bonne  
croissance d'un  
arbre en milieu  
agroforestier par  
technologie Lidar.

la constituer. Nourrir son troupeau au pâturage présente de nombreux avantages, économiques d'une part en facilitant l'autonomie de l'éleveur mais aussi pour la santé et la productivité des animaux. Cependant, pour cela le choix des semences est crucial afin d'assurer les propriétés attendues. Construit par l'équipe MAGELLAN de l'UMR AGIR en Occitanie avec l'aide de 300 éleveurs et 16 conseillers agricoles, le logiciel CAPFLOR propose la recommandation de mélanges de semences (6 à 14 espèces ou variétés) adaptés au sol et au climat de la parcelle choisie mais aussi aux pratiques de l'agriculteur.

#### Une vision au-delà de la parcelle

L'agroécologie intègre l'échelle des écosystèmes et se met en œuvre depuis l'intérieur de la parcelle jusqu'aux paysages et aux territoires, là où se jouent les interactions animales et végétales. Elle mobilise donc la collaboration entre les agriculteurs pour coordonner leurs actions.

Le numérique peut aussi aider à mieux identifier les flux de matières, modéliser les systèmes et permettre la construction de nouveaux modèles d'économie circulaire. Ainsi, la place de marché Organix, créée par Suez, met en relation produc-



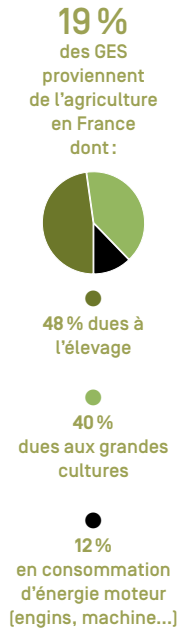
teurs de déchets et gestionnaires de méthaniseur afin d'optimiser leur approvisionnement et les flux. La start-up Maelab, issue du laboratoire Agromie et Environnement (UMR INRAE – université de Lorraine), propose d'accompagner les acteurs des territoires dans la conception et l'évaluation de scénarios de changements menés à l'échelle de la parcelle, de l'exploitation agricole et du territoire. L'ambition du projet de recherche lié, développé actuellement dans le cadre du Programme et équipement prioritaire de recherche (PEPR) FairCarboN lancé en 2022 est de créer une plateforme de modélisation pour évaluer la dynamique du carbone à l'échelle territoriale. À terme, elle permettra de faire un diagnostic des flux de carbone et de proposer des scénarios d'évolution à horizon 2030 et 2050 des usages, notamment industriels, et de l'occupation des terres.

#### Un facteur d'atténuation du changement climatique

Réduire la pollution de l'air, de l'eau et du sol par une utilisation adaptée des fertilisants organiques, limiter les émissions de gaz à effet de serre (GES) par la gestion des sols ou du couvert végétal, ou bien encore la réintroduction de la biodiversité avec des haies et des prairies permanentes sont des services rendus à l'environnement.

Pour Véronique Bellon-Maurel, « de la même façon que le numérique permet de faire de la médecine individuelle, il pourrait être utilisé pour un suivi des agro- et des écosystèmes. La nouvelle PAC demande d'évaluer de façon plus fine les impacts de notre production et de s'engager dans une gestion plus sobre des ressources (moins 20 % d'apport d'azote minéral par exemple dans le Pacte vert). Des systèmes permettant de générer facilement et à grandes échelles des données sur le stockage du carbone ou de l'azote dans le sol ou sur l'état de la biodiversité sont attendus ».

En France, l'agriculture est classée deuxième ex aequo avec l'industrie manufacturière sur le podium des activités humaines émettrices de GES (19% du total<sup>3</sup>). Parmi les filières pointées du doigt: l'élevage avec 48% du total (surtout via le méthane – CH<sub>4</sub>), les grandes cultures avec 40% (surtout via le protoxyde d'azote – N<sub>2</sub>O). Depuis 1990, cependant, les émissions sont en baisse constante (9%). Pour diminuer cet impact, en complément des efforts pour réduire les émissions, l'initiative « 4 pour 1 000 » soutenue par INRAE vise à augmen-



3. Rapport 2021 du CITEPA; [bit.ly/3MGw8FV](https://bit.ly/3MGw8FV)

ter annuellement de 0,4% le stockage de carbone dans tous les sols agricoles du monde, soit l'équivalent à l'échelle mondiale des émissions annuelles de CO<sub>2</sub> liées aux activités humaines. Comment? Notamment en favorisant le maintien des prairies permanentes. Mais aussi en modifiant les pratiques dans les zones de grandes cultures. Parallèlement, les politiques publiques, Pacte vert européen, Stratégie nationale bas-carbone, veulent encourager les pratiques favorables à l'environnement dont le stockage de carbone dans les sols. Pour vérifier leur efficacité, elles ont besoin d'indicateurs fiables. Le programme européen NIVA (New IACS Vision in Action), auquel participe INRAE, œuvre au développement de méthodes permettant de calculer des indicateurs correspondant à trois objectifs de la PAC: le stockage du carbone, le lessivage des nitrates et la biodiversité. La démarche est basée sur la combinaison de données issues de plusieurs sources: le registre parcellaire graphique (RPG) de la PAC qui enregistre les déclarations des agriculteurs (contours de parcelles, cultures produites, pratiques...), les données des satellites Sentinel, des données en accès libre comme les données météorologiques et enfin des données issues des agriculteurs eux-mêmes. Ces données hétérogènes nécessitent des traitements dédiés afin de pouvoir les associer et les analyser conjointement à la bonne échelle. →

**L'agroécologie s'appuie sur les fonctionnalités des écosystèmes et les amplifie pour générer des services de régulation, tout en limitant les pressions engendrées par l'activité humaine.**

# EXPÉRIMENTATION

## La révolution chez les robots

**Les robots sont appelés à évoluer pour correspondre aux nouveaux besoins. Ils doivent être capables de s'adapter pour faire face à la diversité des parcours de cultures, des animaux d'élevage ou des environnements.**

Les robots doivent s'adapter aux pratiques de binage ou de désherbage différencié, délaissées au profit des produits phytosanitaires depuis des décennies et pour lesquelles il s'agit de trouver une alternative.

Le Challenge ROSE, programme de recherche et d'expérimentation financé conjointement par le programme Ecophyto et l'ANR, a mis en concurrence depuis 2015 quatre

équipes associant recherche publique et équipementiers pour développer des solutions mécaniques et technologiques en alternative aux herbicides. Les projets couvrent toute la chaîne, de l'identification des mauvaises herbes sur le rang de culture jusqu'à leur élimination sélective dans une solution robotique intégrée.

Les capacités d'adaptation offertes par les outils robotiques constituent un atout décisif pour effectuer des travaux de haute précision, pour différencier des cultures pluricomplexes et agir de manière localisée et spécifique. De tels travaux, difficilement envisageables manuellement à grande échelle, nécessitent le développement de nouveaux outils pouvant intervenir de manière autonome. Pour cela, la réflexion dépasse la seule machine pour se développer au niveau d'un système composé de plusieurs robots, potentiellement coopérants. Il devient alors possible de sélection-

ner le nombre de robots et leurs rôles en fonction de la tâche à réaliser et du contexte. Ces nouveaux agroéquipements modulaires, plus légers, moins impactants pour les sols et coopérants seraient donc partageables entre plusieurs exploitants. Une telle vision radicalement nouvelle s'inscrit dans la continuité des travaux de recherche résultant du projet Adap2E<sup>1</sup>.

Pour aller encore plus loin, INRAE s'est associé à l'agroéquipementier SabiAgri pour travailler au dialogue Homme-robot. Ainsi le laboratoire commun Tiara<sup>2</sup> mène des recherches sur la capacité décisionnelle (IA) et la reconfiguration en ligne de comportements robotiques. Ces travaux se prolongent plus avant sur le territoire national, où Inria, CEA et INRAE coordonnent le projet NinSar. Celui-ci regroupe la communauté robotique française pour le développement de manipulateurs mobiles de taille réduite pour la réalisation d'itinéraires culturaux agroécologiques<sup>3</sup>.



←

Ce robot viticole TED enjambe les vignes pour désherber avec précision aux pieds du cep et limiter la compétition pour l'eau.

1. Voir note 2 p. 17.

2. Tiara (Towards intelligent adaptable robots for agriculture) est un laboratoire de recherche collaboratif financé par l'ANR dans le cadre du programme LabCom 2019, réunissant

l'équipe Romea de l'unité TSCF et la société SabiAgri; [www6.inrae.fr/tiara](http://www6.inrae.fr/tiara)

3. Financé dans le cadre du PEPR Agroécologie et numérique, porté par la stratégie d'accélération Sadea.





© INRAE - Christophe Maître

**Une autonomie nouvelle pour renforcer la place de l'agriculteur**

En permettant une détection automatique des comportements anormaux de ses vaches, les puces électroniques qu'elles portent réduisent le temps de surveillance de l'éleveur, en rendant automatique la livraison des rations dans les auges, le robot lui évite une tâche répétitive et pénible... Le numérique redonne du temps à l'agriculteur pour mieux prioriser ses actions et être maître de sa stratégie en toute connaissance. Il lui donne les moyens d'être plus autonome. En le rapprochant des consommateurs, quels qu'ils soient, il lui donne l'opportunité de choisir son mode de production et d'avoir plus de pouvoir sur le niveau de sa rémunération. En rendant visible et renforçant sa contribution à la biodiversité des paysages et à l'amélioration des biens communs, il lui apporte la fierté d'agir pour la société.

**Des pertes évitées**

Les pertes et gaspillages représentent 30 % de la production agricole mondiale. En cultures céréalières, les pertes de grains pendant le stockage peuvent atteindre 10 % des volumes, en grande partie à cause du développement de moisissures

↑  
En Bretagne, l'Institut de génétique expérimente des capteurs de détection du mildiou sur des pommes de terre. Ces capteurs alimentent des tableaux de bord.

lié à l'humidité. Le projet SISAM<sup>4</sup>, piloté par PANAM France SAS et impliquant le LAAS-CNRS, développe actuellement un système de suivi de l'état des stocks de semences et de pilotage à distance de l'atmosphère des silos (température, taux d'humidité, de CO<sub>2</sub>, pression). Au-delà des volumes sauvés, des traitements post-récolte sont ainsi évités et la consommation d'énergie est optimisée. En ville, les applications comme togoodtogo permettent d'acheter des produits à date limite courte et participent à la réduction du gaspillage et aux flux des denrées alimentaires au sein d'un territoire.

Les approches agroécologiques et la durabilité nécessitent une approche systémique des actions sur un territoire. Elle impose une vision globale et une meilleure anticipation des risques. Assistées par le numérique, ces approches peuvent se déployer à grande échelle, sous réserve d'éviter certains écueils. ●

4. Projet SISAM – Système intelligent de stockage de semences

sous atmosphère modifiée.  
[bit.ly/3TcN2OH](https://bit.ly/3TcN2OH)

# UN ACCÉLÉRATEUR DE TRANSITION SOUS CONDITIONS

En offrant des opportunités de compréhension, d'action et de communication inégalées et renouvelées, le numérique représente un puissant levier au service de la transition agroécologique et d'une alimentation durable. Cependant, dans ce moment d'accélération des technologies et des changements, la vigilance s'impose sur certains points.

## Tour d'horizon.

Après la FinTech, la MedTech, la FoodTech, place à l'AgTech<sup>1</sup>. Elle concentrait 51,7 milliards de dollars d'investissement en 2021 et compte des milliers de start-up dans le monde<sup>2</sup>, dont environ 400 en France. Devant les potentiels de développement, les investisseurs et entrepreneurs en ont fait un de leurs secteurs prioritaires. Les développements se font en réponse à des objectifs et des usages diversifiés. Avec une limite: les pratiques et les connaissances héritées de l'industrie ne correspondent pas toujours aux caractéristiques de l'agriculture. « *Le développement d'une agriculture numérique adaptée à l'agroécologie est en marche. L'inventaire des apports du numérique en termes de nouvelles capacités d'acquisition de données, de traitement, d'automatisation des tâches, de connectivité et d'échanges dématérialisés permet d'envisager un bouquet de solutions pour contribuer à la transition vers des agricultures et des systèmes alimentaires durables, respectant les hommes et les animaux. Identifier les risques est cependant nécessaire pour ne pas se tromper de chemin* », explique Véronique Bellon-Maurel.

### **Veiller à l'accessibilité et au codéveloppement des outils**

Grâce au numérique, des gains importants liés à

1. Utilisation de la technologie en agriculture, horticulture et aquaculture (logiciels, automatisation et analyse des données) pour améliorer le rendement, l'efficacité et la rentabilité du secteur agricole.

2. [url.inrae.fr/3FyZFQk](https://url.inrae.fr/3FyZFQk)

3. Étude Agrinautes 2022, [bit.ly/3gajWkt](https://bit.ly/3gajWkt)

la qualité de production, aux cobénéfices environnementaux et à la baisse des coûts de production (moins d'intrants) vont devenir accessibles au plus grand nombre. Encore faut-il s'assurer que les destinataires de ces gains, ici les agriculteurs, y aient accès et en tirent effectivement profit.

Dans les champs ou les étables, les capteurs sont autonomes et sans fil. Alors, comment transmettre les données? Le wifi est écarté, car il consomme trop d'énergie et les réseaux cellulaires (3G, 4G, 5G) couvrent mal les zones agricoles. La couverture 3G a connu une forte progression récemment et concerne 95%<sup>3</sup> des agriculteurs, mais bien souvent seul le siège de l'exploitation est connecté. Enfin, 5% des connectés doivent encore se contenter de bas débit. « *Nous devons mettre en place des réseaux spontanés qui remontent de capteur en capteur, ou quelquefois par un réseau hybride avec les drones ou tracteurs qui passent à proximité* », raconte Nathalie Mitton (Inria). « *L'idée est d'exploiter tous les types de communication qui existent, cela peut même être du côté des fréquences FM.* » La complétude de la couverture numérique des territoires est donc toujours à encourager.

Les outils numériques sont un des leviers de la rentabilité des exploitations. Mais encore faut-il



qu'ils soient adoptés par les agriculteurs et les acteurs du secteur agroalimentaire. Par exemple, si un OAD fournit trop de fausses alertes ou est trop compliqué à utiliser, il risque d'être abandonné. Les chercheurs INRAE travaillent sur les freins et les facteurs d'adoption : les données sont-elles pertinentes ? Sous quelle forme doivent-elles être présentées ? L'interface est-elle suffisamment ergonomique et simple d'utilisation ? À ces questions techniques ou sociologiques s'ajoute un questionnement éthique. De quelle manière l'utilisateur se servira-t-il de cette connaissance ? L'innovation ouverte, qui intègre l'ensemble des parties prenantes dès le début des processus d'innovation, est une approche à mobiliser pour répondre à ces questions.

Florence Amardeilh, cofondatrice d'Elzeard, une application de planification des actions pour la production de fruits et légumes, revient sur la genèse du projet : « *En allant sur le terrain, nous avons constaté que beaucoup de maraîchers utilisaient encore des notes papier ou des tableaux Excel. Comme nous ne voulions pas imposer un outil informatique, nous avons appris le métier et sommes allés à la rencontre des acteurs de la filière. Nous avons échangé avec eux pendant deux ans avant d'écrire la première ligne de code et développer un logiciel à partir de leurs besoins.* »

L'accessibilité, c'est aussi bien sûr la question du coût ou plutôt du rapport coût/bénéfice pour cette population qui sait s'endetter quand elle pense y trouver son compte. D'autant que la rentabilité dépend de la taille des exploitations. Ainsi, Xavier Reboud rappelle l'aventure de la start-up AirInnov qui proposait des images des champs aux agriculteurs. « *Alors que le drone semblait représenter un véritable atout pour affiner le travail dans les champs grâce à une meilleure observation des cultures, la société a fait faillite en 2019. Avec un gain moyen limité à 70 euros à l'hectare par an, certains agriculteurs se sont détournés d'un service devenu trop coûteux.* »

#### **Garantir la gouvernance des données et la souveraineté de leurs fournisseurs**

Une donnée seule n'a aucune valeur. En revanche, combinée à d'autres données, elle pourra devenir très utile. Plus qu'ailleurs, les informations liées à l'agriculture sont souvent d'origines très diverses. Comment s'assurer de leur qualité et de leur interopérabilité, condition requise pour des systèmes opérationnels ? →

#### INNOVATION ET ACCESSIBILITÉ

## Un laboratoire ambulant d'applications

**Le Mobilab AgroTIC, créé par l'Institut Agro, est un laboratoire roulant et itinérant, cofinancé par la Chaire AgroTIC et le Territoire d'innovation Occitanum. Sa mission : sensibiliser les agriculteurs aux nouvelles technologies appliquées à l'agriculture. Son responsable, Simon Moinard, témoigne : « Nous allons chez les agriculteurs pour leur faire toucher du doigt la diversité des capteurs, leur expliquer leur fonctionnement et leurs limites. Par les animations ludiques, les agriculteurs découvrent le champ des possibles et réfléchissent ensemble à de nouveaux systèmes qui pourraient faciliter leur quotidien.**

**Ces échanges font coup double : nous remontons leurs besoins et pratiques pour développer de nouveaux capteurs plus pertinents, et eux deviennent plus aguerris aux nouvelles technologies. Avec nos tutoriels, certains ont même développé leurs propres solutions à bas coût ! Un capteur pour activer une pompe à distance ou pour optimiser l'irrigation. Si le numérique fait peur à certains au début, ils sont vite convaincus de la simplicité des systèmes et du potentiel : sauver des récoltes, réduire leur impact environnemental, gagner en confort de travail, etc. »**



La Commission européenne estimait dans son rapport *Cost of not having FAIR research data*, paru en 2019, le coût de la mauvaise gestion des données de la recherche à 10,2 milliards d'euros<sup>4</sup> pour l'Europe chaque année, dû aux pertes de temps, à la non-optimisation des coûts de stockage, aux frais de licence, aux problèmes de duplication de la recherche, au manque de fertilisation croisée. Ce rapport pointe que, contrairement aux idées reçues, l'ouverture et le partage des données en recherche favorisent leur détenteur. Ainsi, une récente analyse<sup>5</sup> des publications scientifiques montre que les publications renvoyant à des données associées et donc accessibles étaient plus citées que les autres. C'est pourquoi la Commission milite, comme l'État français, pour l'ouverture des données en prônant des données « FAIR » pour « Faciles à trouver, accessibles, interopérables et réutilisables ». Ainsi, pour les données issues de la recherche, le gouvernement a confié en 2021 le développement technique de la partie entrepôt et catalogue de données de la plateforme Recherche data gouv à INRAE. Depuis juillet

4. [bit.ly/3ArQ7mE](https://bit.ly/3ArQ7mE)

5. Colavizza G. et al. 2020. [bit.ly/3T8ZAH6](https://bit.ly/3T8ZAH6)

6. [recherche.data.gouv.fr/fr](https://recherche.data.gouv.fr/fr)

7. Aubin S. et al., 2017.

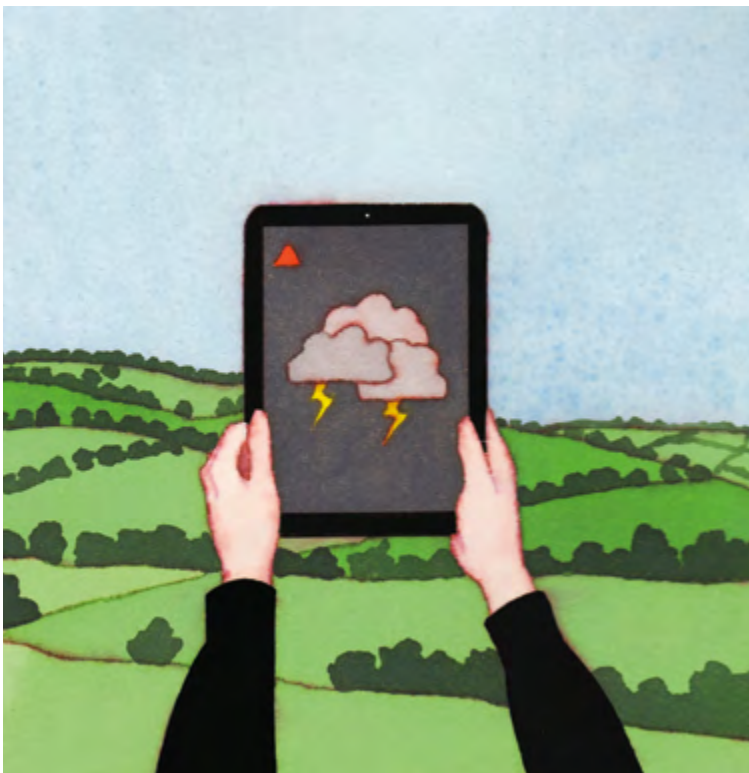
8. Agro EDI Europe a été créée en 1992, par la Coopération Agricole, l'Union InVivo et l'Association nationale de révision. Elle travaille sur la normalisation et la standardisation des messages et des échanges pour assurer l'interopérabilité des systèmes dans le secteur agricole.

2022, la plateforme<sup>6</sup> met à disposition de tous les chercheurs qui n'auraient pas de solution de dépôt de confiance de leurs données, un entrepôt pluridisciplinaire.

Isabelle Piot-Lepetit témoigne et souligne cependant la nécessité d'une gouvernance claire pour le recueil des données auprès des acteurs: « *Dans le cadre d'une thèse sur les biens communs, un docteur a essayé de faire une plateforme ouverte sur des semences paysannes. Les agriculteurs ont refusé de coopérer, car ils préfèrent des structures fermées qui utilisent leurs données pour des besoins en interne et bien définis avec des contreparties en échange. Pour développer des structures ouvertes et mutualiser les informations, il faut avoir confiance dans la gouvernance. Des règles de gestion des informations doivent être notamment mises en place afin que les participants ne se sentent pas dépouillés et qu'ils restent acteurs du système* ».

La question est souvent aussi liée au vocabulaire numérique qui utilise un lexique particulier. Des travaux de recherche sont en cours, comme celui du groupe de travail de la Research Data Alliance (RDA) AgriSemantic pour créer une « langue commune » afin d'améliorer l'échange et le partage des données agricoles. Il étudie pour cela les vocabulaires utilisés et leurs liens sémantiques<sup>7</sup>. Au-delà de la qualité du recueil et leur stockage, l'enjeu est aussi de rapprocher des données de sources et de natures diverses. Pour cela, des référentiels communs s'imposent. L'association Agro EDI Europe<sup>8</sup>, dont INRAE est adhérent, a pour mission d'harmoniser les échanges de données numériques entre les acteurs du monde agricole. Si les standards établis au sein de l'association pour la supply chain agricole (factures, commandes, etc.) représentent aujourd'hui 99 % des échanges, de nombreux standards restent encore à déployer, notamment pour les données parcellaires (sur les événements comme les semis, traitements, etc.).

« *Un standard, c'est un peu comme la structure grammaticale d'une phrase. Notre rôle est de structurer et documenter l'utilisation des données à partir de standards internationaux et en prenant en compte les besoins de nos adhérents. Pour le standard « facture d'approvisionnement », par exemple, nous reprenons la norme internationale (EDIFACT INVOIC) pour laquelle les spécificités du monde agricole sont documentées. Parallèlement à cela, nous avons créé et maintenons des référentiels de*





données techniques harmonisées qui donnent un code à chacun des mots de la phrase. Nous éditons en quelque sorte un dictionnaire commun pour tout le secteur afin que tous parlent la même langue», explique Marie Beuret, responsable projets et communication chez Agro EDI Europe.

### Privilégier une gestion sur mesure et humaine

« Nous avons voulu savoir comment la nouvelle génération envisageait la place du numérique en agriculture », explique Xavier Reboud. Pour cela le groupement d'intérêt scientifique Relance Agronomique a lancé un concours de BD dans les écoles d'ingénieurs et lycées agricoles « Demain l'@griculture ». Les 57 œuvres réalisées en 2018 exprimaient, entre autres, la crainte d'un numérique utilisé à l'excès, qui s'interpose entre l'être humain et ses animaux ou la terre. Un numérique qui standardise, voire aliène au détriment d'une gestion sur mesure et humaine.

De quoi parle-t-on ? Prenons l'exemple d'un élevage de porcs. Difficile pour l'éleveur de détecter à l'œil nu si un animal a de la fièvre. Avec des capteurs infrarouges surveillant l'animal, il devient possible d'obtenir la température en direct, et même d'être alerté quand elle entre dans le rouge. Le numérique est alors d'une aide précieuse. Mais le système peut aller plus loin et procurer automatiquement au cochon, identifié grâce à son numéro, un traitement dans son auge. Plutôt que d'alerter l'éleveur qui va chercher la cause et traiter l'animal, le système prend en charge automatiquement le traitement de l'individu. L'éleveur est alors remplacé par la machine. Cela peut avoir un effet pervers : l'éleveur peut alors déléguer son expertise à la machine et devenir un simple technicien, tributaire d'une machine et de son bon fonctionnement. Ainsi, au lieu d'être « augmenté » car informé d'une donnée initialement difficile d'accès, la technologie le diminuerait dans son expertise. Les sociologues anglo-saxons appellent cela le deskilling.

Le numérique en agriculture s'est fait connaître via l'agriculture de précision. Pilotées par les OAD selon des modèles, les actions se réduisaient à des zones ou individus précis « à traiter » dans une seule logique économique. Pour Véronique Bellon-Maurel, il faut sortir de ce paradigme : « Nous ne devons pas nous arrêter à utiliser ces technologies uniquement pour gérer les hétérogénéités et amé-



**12 %**  
part du numérique  
dans la consommation  
d'électricité en  
France en 2019

liorer la performance économique. Le numérique aujourd'hui est à la fois plus simple à mettre en œuvre qu'hier et va au-delà de la parcelle. Notre objectif est de construire un numérique qui intègre ces questions de diversité et d'autonomie des agriculteurs ».

### Prendre en compte les coûts environnementaux

La part du numérique dans la consommation globale d'électricité en France a été évaluée en 2019 par le Conseil général de l'économie, de l'industrie, de l'énergie et des technologies à environ 12%<sup>8</sup>. La question de l'impact environnemental se pose pour le numérique en agriculture comme partout. Le livre blanc *Agriculture et numérique*<sup>9</sup> insiste ainsi sur la nécessité de réduire les dépenses énergétiques, la consommation des autres ressources (renouvelables ou non renouvelables) et les pollutions engendrées par l'usage des technologies. Le développement de solutions numériques doit ainsi être pensé en termes de coûts, que ce soit de matériel (composants utilisés, taille, nombre, notamment pour les capteurs et la →

8. [bit.ly/3Twa96C](https://bit.ly/3Twa96C)

9. [url.inrae.fr/3HBktEe](https://url.inrae.fr/3HBktEe)

robotique), de données produites (nature, nombre, stockage) ou de puissance de calcul nécessaire pour que le but soit toujours d'économiser les ressources naturelles (eau, minéraux) et l'énergie. Selon Nathalie Mitton, « nous sommes pour l'instant incapables d'évaluer ces coûts globaux consolidés en termes d'énergie, de matière ou de pollution. Par exemple, les capteurs déployés dans les champs pour mesurer le taux d'humidité dans la terre et cibler les parcelles à arroser permettent une économie d'eau significative. Mais combien faut-il d'eau pour extraire les métaux précieux, les terres rares nécessaires à la fabrication de ce capteur? Leur recyclage requiert également de l'eau et de l'électricité. Finalement est-on vraiment gagnant sur l'ensemble de la chaîne? ».

Les méthodes d'analyse du cycle de vie (ACV) développées par le pôle INRAE ELSA à Montpellier et les bases de données de la plateforme MEANS permettent de déterminer l'impact environnemental de la fabrication d'un produit sur toute sa « vie » (des matières utilisées, à l'énergie consommée en intégrant la logistique et jusqu'à sa destruction/son recyclage). INRAE et ses partenaires mènent conjointement des études en sciences sociales et en économie sur les coûts environnementaux engendrés par le développement du numérique en agroalimentaire. Les axes majeurs retenus dans le livre blanc se concentrent sur la limitation du nombre de capteurs, le choix des solutions les moins énergivores, l'objectif d'équipements à longue durée de vie et le soutien à la High Low Tech.

#### Mettre la frugalité en priorité

La High Low Tech initiée par le Massachusetts Institute of Technology – MIT désigne des solutions intégrant high-tech (modules électroniques, informatiques) à des constructions low-tech.

## Le développement de solutions numériques doit aussi être pensé en termes de coûts.

10. Atelier ouvert à tous pour fabriquer des objets au moyen d'ordinateurs.

11. Le développement du numérique dans les trajectoires d'écologisation de l'agriculture en France. Thèse INRAE soutenue en juillet 2022.

Elle utilise des technologies simples, peu onéreuses, accessibles à tous et facilement réparables, avec des moyens courants, localement disponibles et du recyclage. La High Low Tech est souvent développée par les utilisateurs de façon collective dans des FabLabs<sup>10</sup>.

Dans le cadre des réflexions sur la sobriété, la blockchain (voir page 24) interroge sur son coût énergétique, d'autant plus important que le réseau est ouvert au public. Plusieurs études relatives par le site EcoInfo du CNRS aboutissent à l'estimation d'une consommation électrique mondiale en 2019 comparable à celles de pays comme l'Autriche, la Belgique ou le Danemark. Cependant des solutions pour un impact inférieur sont en cours d'élaboration ; ainsi, le projet Enthereum réunissant des acteurs et utilisateurs de cryptomonnaie annonçait en septembre 2022 la production d'une blockchain beaucoup plus frugale. Les coopératives et les chambres d'agriculture, elles aussi, montent au créneau. Notamment en s'assurant que les innovations numériques répondent précisément aux besoins de leurs adhérents. Quitte à recadrer les acteurs de l'AgTech qui, par souci de rentabilité, seraient tentés de proposer des options séduisantes certes, mais coûteuses, inutiles voire mauvaises pour l'environnement. Une précaution d'autant plus nécessaire que les travaux de thèse d'Éléonore Schnebelin<sup>11</sup> montrent que si certains acteurs de l'AgTech s'efforcent de prendre en compte l'impact environnemental lié au développement et à l'usage de leurs solutions digitales, d'autres n'en ont pas conscience ou n'en font pas grand cas ou n'imaginent pas certains impacts négatifs.

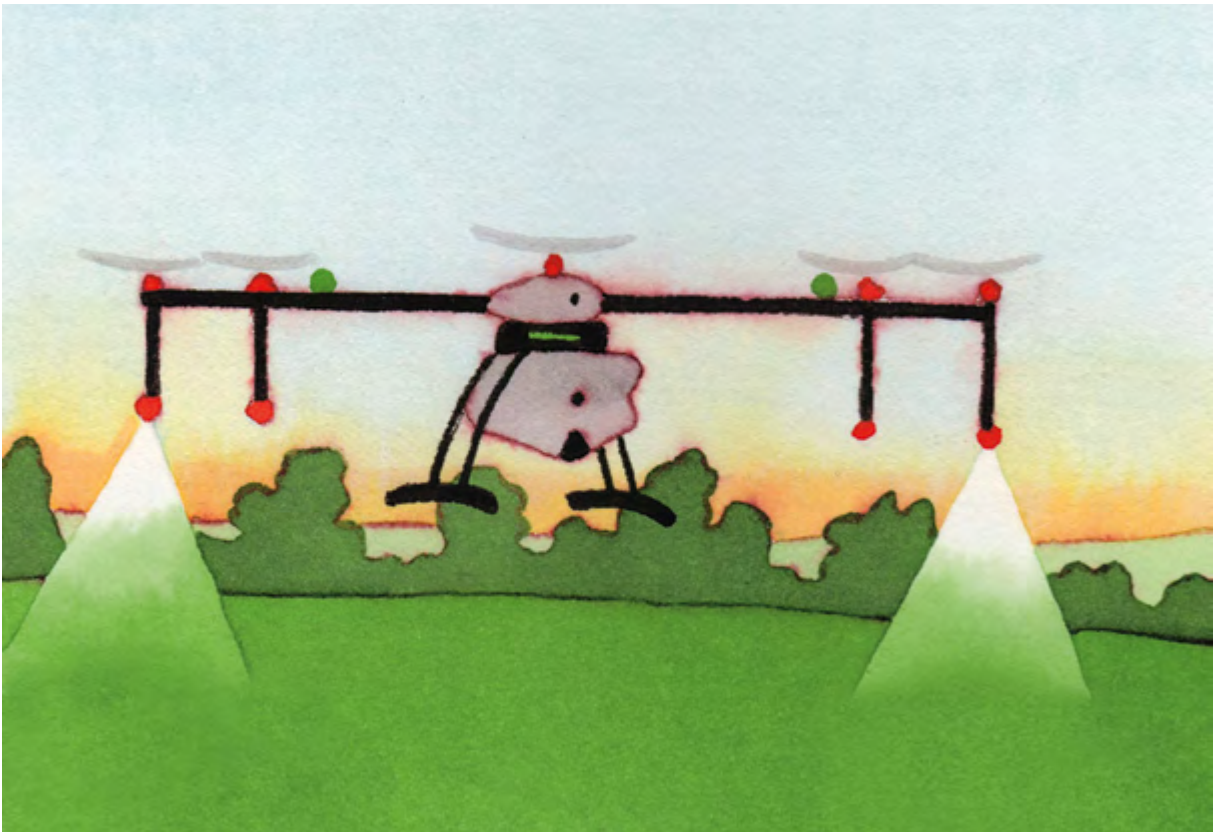
Afin de répondre à ces préoccupations majeures et pour que le numérique serve l'agroécologie, quelques principes ont été définis par les équipes d'Inria et d'INRAE pour la recherche et le développement des technologies et pratiques : l'inclusion des parties prenantes dans l'ensemble du processus d'innovation, l'anticipation des risques, la réactivité vis-à-vis des transformations extérieures et la réflexivité sur les actions entreprises. Ces quatre principes permettent de maximiser les bénéfices et l'appropriation, tout en limitant les risques inhérents à toute innovation. Comment la recherche et l'innovation en France s'organisent-elles pour les appliquer? ●



# LE DÉFI DU DÉPLOIEMENT À GRANDE ÉCHELLE

Le moment est décisif! La massification des données, la puissance de l'intelligence artificielle, l'intérêt des investisseurs convergent pour un déploiement à grande échelle du numérique en agriculture. Comment s'assurer qu'il se fasse au profit de systèmes agricoles et alimentaires durables?

*Action.*



Avec des technologies matures, rentabilisées dans d'autres secteurs, le champ des possibles s'est fortement agrandi. Engagé dans la voie de l'agroécologie, INRAE s'est associé à Inria afin de s'assurer que les priorités de recherches servent cet objectif de rupture. Mais au-delà des progrès technologiques, l'enjeu est également organisationnel, économique, social, voire politique. L'heure est à l'interdisciplinarité, où les solutions technologiques sont aussi analysées du point de vue des sciences humaines et sociales. Elle est à la collaboration tout au long d'un processus d'innovation devenu plus itératif pour permettre une adaptation aux évolutions continues des environnements. C'est pourquoi, encouragés par les pouvoirs publics, la recherche, les acteurs du développement et les acteurs socioéconomiques changent de méthode et s'ouvrent aux futurs utilisateurs pour développer des solutions co-construites et adaptables. Pensées ensemble, elles répondent mieux aux besoins et sont d'appropriation plus facile. Reste alors à s'assurer de la transmission de ces nouveaux savoirs et nouvelles pratiques grâce à une formation à tous les âges.

#### **Adapter les technologies numériques aux spécificités de l'agriculture**

L'enjeu est de taille : coupler transition agroécologique et transition numérique ! Pour relever ce défi, INRAE et Inria renforcent leur collaboration. Partenaires sur de grands programmes, dont le récent Programme et équipements prioritaires de recherche (PEPR) « Agroécologie et numérique » soutenu dans le cadre de France 2030 ou encore #DigitAg, les deux instituts ont déjà réalisé ensemble plus de 400 publications scientifiques et de nombreux développements (logiciels, applications...). Téléchargée par une vingtaine de millions de personnes, l'application Pl@ntnet qui permet la reconnaissance de plantes à partir d'une photo prise avec son smartphone est un de leurs bébés. En juin 2022, un nouveau cadre partenarial pluriannuel confirmait cette ambition partagée entre INRAE et l'Inria et insistait sur l'intensification nécessaire des collaborations dans les domaines de la biologie numérique, des bâtiments connectés, du bien-être animal, de la réduction de la pénibilité, de la robotique, des capteurs et de l'optimisation de réseaux pour disposer de données, des OAD et de l'autonomisation des agriculteurs

MARCHÉ  
DES AGRO-  
ÉQUIPEMENTS

8 Mrd €  
en 2021

18 Mrd €  
en 2025

## **Le numérique fait passer l'expérimentation à une nouvelle ère, en associant agriculteurs et chercheurs et en permettant le partage des expérimentations, leur évaluation et la capitalisation des savoirs.**

face à ces outils. Avec aussi la volonté de développer des outils participatifs qui leur soient utiles. Et la tâche est parfois immense quand il faut imaginer les outils pour intégrer toute la complexité des systèmes concernés comme les jumeaux numériques (voir page 27). Ce sont des représentations numériques qui permettent à la fois de prédire l'évolution des systèmes mais aussi de les gérer. Ils pourraient permettre de faciliter et accélérer l'expérimentation, en proposant une réplique numérique la plus proche possible du système d'intérêt. Ils permettent ainsi de tester des pratiques ou des systèmes nouveaux dans différentes configurations, et d'anticiper les conditions de réalisation et d'efficacité de ces innovations dès la phase de conception. Ils alimentent des processus d'apprentissage impossibles à conduire dans le temps d'une vie. Mais comment développer des jumeaux numériques pour les activités agricoles, impliquant de multiples acteurs et soumises à des aléas ? Comment évaluer leurs potentiels dans les exploitations agricoles pour accompagner la transition agroécologique ? Ce sont des défis de taille.

#### **Innover collectivement : sciences participatives et partenariats avec les filières**

Les sciences participatives invitent l'ensemble de la société à participer à la recherche et à co-

1. [digifermes.com](https://www.digifermes.com)



construire les innovations. Avec des applications permettant le recueil de données provenant de multiples sources, le crowdsourcing décuple le potentiel de recherche. Ainsi, le projet GERO-NIMO collecte les données des industries porcines et avicoles en complément des données de la recherche. L'objectif est de fournir aux éleveurs de nouvelles connaissances et de nouveaux outils pour promouvoir des méthodes innovantes, pour une sélection des espèces plus adaptée aux besoins locaux tout en prenant en compte les problématiques environnementales.

Le projet LACCAVE a impliqué, durant 10 ans, la totalité des acteurs de la viticulture, pour communiquer sur les conséquences du changement climatique, construire et évaluer différentes stratégies d'adaptation. Grâce notamment à des modèles alimentés par les données fournies par l'ensemble de la filière, des solutions partagées ont pu émerger au niveau territorial et au niveau national (renouvellement des cépages, pratiques de taille ou de greffe, etc.), aboutissant en août 2021 à la présentation au ministre en charge de l'Agriculture d'une feuille de route de la filière pour son adaptation au changement climatique.

Mais passer de l'agriculture conventionnelle à l'agroécologie demande une prise de risque trop grande pour nombre d'agriculteurs. Comment faciliter la transition à grande échelle ?

### **Des expérimentations et des données pour nourrir la recherche**

L'expérimentation au cœur du processus de recherche se réalise depuis des siècles dans des fermes dédiées. INRAE est animateur scientifique de nombreux réseaux d'exploitations qui s'engagent dans de nouvelles pratiques avec de nouveaux outils. Le numérique fait passer ces pratiques à une nouvelle ère, en associant agriculteurs et chercheurs tout au long du processus et en proposant partage des expérimentations, évaluation et capitalisation des savoirs.

C'est également le principe des Digifermes<sup>®1</sup>, portés principalement par les instituts techniques agricoles et les chambres d'agriculture. Chaque ferme est appuyée par une structure de recherche, développement et innovation, pour mener des évaluations objectives et rigoureuses des nouveautés technologiques. Ouvertes aux entreprises du numérique, start-up, organismes agricoles et →

## ENSEMBLE

# Des expérimentations pour tous

**Une équipe de chercheurs de huit pays (Argentine, Australie, Canada, Chine, États-Unis, Malaisie, Maroc, Royaume-Uni), avec INRAE et l'institut #DigitAg pour la France, a identifié six principes pour des expérimentations « nouvelle génération », appelées On-Farm Experimentation (OFE)\* par les chercheurs :**

→ **CONDITIONS RÉELLES**  
Les expérimentations sont conduites sur des exploitations, et s'insèrent dans l'itinéraire technique.

→ **CENTRÉES AGRICULTEUR**  
Elles sont centrées sur les questions de l'agriculteur et codirigées, au minimum, par l'agriculteur et les scientifiques.

→ **BASÉES SUR LES DONNÉES**  
Elles sont fondées sur l'analyse de données de terrain et, en ce sens, facilitées (mais pas conditionnées) par les technologies numériques.

→ **COAPPRENTISSAGE**  
Elles sont focalisées sur l'échange entre les participants qui, à travers l'élaboration des expérimentations, partagent leurs visions et expériences, apprennent ainsi les uns des autres, et développent de nouvelles idées ensemble.

→ **APPORT D'EXPERTISES**  
Elles facilitent les apports externes, permettant la prise en main de nouveaux outils et la considération de points de vue variés.

→ **DESTINÉES AU CHANGEMENT D'ÉCHELLE**  
Elles sont menées dans un objectif de généricité des connaissances.

\*[ofe2021.com/](https://ofe2021.com/)



© Occitanum

à tous ceux qui veulent faire avancer l'agriculture, l'objectif des Digifermes® est de promouvoir une agriculture numérique qui réponde aux besoins des agriculteurs, en menant deux types d'actions, l'évaluation en conditions réelles de nouvelles technologies et de prototypes et la co-conception et la coconstruction avec les utilisateurs d'innovations numériques.

Ce mouvement On Farm Experimentation (OFE) rassemble au moins 30 000 exploitations dans le monde. En France, le réseau des 3 000 fermes DEPHY du plan Ecophyto, engagées dans la réduction de l'utilisation des produits phytosanitaires, et celui des fermes d'élevage suivies par les instituts techniques et les chambres d'agriculture pour des systèmes durables, en sont des exemples. Concrètement, les initiatives OFE suivent un processus où, étape après étape, l'agriculteur et le chercheur définissent ensemble les questions à aborder et établissent des expérimentations adaptées au contexte de la ferme.

Désormais, les chercheurs emploient les données collectées par l'agriculteur dans la conduite de son exploitation pour nourrir des modèles et élaborer des scénarios destinés à mesurer l'impact d'actions ciblées. La valeur ajoutée est consi-

↑  
Partage  
d'expérience autour  
d'une plantation  
de tomates.

dérable, mais la mise en œuvre de ces pratiques n'est pas si facile. Les OFE impliquent une relation de confiance forte entre les acteurs, notamment pour garantir la protection et le partage équitable des données, qui peuvent être sensibles et représenter un enjeu économique. En octobre 2021, la conférence OFE2021 organisée en France a réuni 170 participants issus de 36 pays qui ont échangé sur ces questions, et insisté sur l'importance de sensibiliser les porteurs de politiques publiques aux atouts de ces initiatives pour la transition agroécologique.

L'État français a créé en 2019 le dispositif des Territoires d'innovation. Ces programmes, financés dans le cadre du Programme d'investissements d'avenir (PIA3), encouragent l'innovation ouverte à l'échelle des territoires pour faire émerger des modèles de développement durable.

Le Territoire d'innovation Occitanum, porté par INRAE avec la Région Occitanie, rassemble entreprises, start-up, collectivités, chambres d'agriculture, pôles de compétitivité et autres acteurs du développement, autour des agriculteurs et des consommateurs. L'objectif : développer des projets numériques innovants en réponse à des besoins précis exprimés par les acteurs : comment



l'abeille pourrait-elle être employée pour servir d'indicateur de la biodiversité sur un territoire urbanisé; comment numériser Biodiv'eau (un outil de recensement des infrastructures agroécologiques, actuellement sur support papier peu adapté à un usage terrain); quelles alternatives au glyphosate pour le désherbage des vergers de pommiers?

Pour répondre à ces questions, les partenaires d'Occitanum observent les pratiques existantes, s'appuient sur des appels à manifestation d'intérêt, animent le dialogue entre acteurs et accompagnent les expérimentations pour identifier la meilleure option numérique. Celle-ci sera alors évaluée pour mesurer son impact environnemental ainsi que le rapport coût-bénéfice associé (sans occulter l'aspect social) et s'assurer de sa triple performance. Documentées, l'expérimentation et la solution seront répliquables et transférables pour une diffusion à grande échelle.

#### Capitaliser les savoirs et former

Une fois les données produites et les connaissances acquises, l'innovation doit être transmise aux acteurs de la filière. La formation est essentielle et, bonne nouvelle, elle est au centre des préoccupations nationales. Ainsi, dans le cadre du plan « Enseigner à produire autrement » lancé en 2014, les élèves de CAP, Bac Pro et BTS de l'enseignement agricole sont désormais sensibilisés aux enjeux de la transition agroécologique. Preuve de cet engagement, la feuille de route du gouvernement pour développer le numérique dans l'agriculture française, détaillée en février dernier, place la « formation au numérique dans l'enseignement et le conseil agricole » en tête des 7 axes de travail. Précurseure dans ce domaine, la spécialisation AgroTIC des écoles Bordeaux Sciences Agro et Institut Agro Montpellier, forme depuis 25 ans les futurs ingénieurs agronomes aux technologies du numérique. Centrale Toulouse Institut-Ensatis (anciennement Toulouse INP-Ensatis) développe à son tour une formation spécifique pour doter les ingénieurs d'une double compétence en numérique et agroécologie. Citons AgroParisTech, qui propose un master 2 : « De l'agronomie à l'agroécologie (AAE) » et qui aborde cet enjeu dans la plupart des formations. Ces écoles sont membres de l'alliance Agreenium, qui réunit la plupart des établissements publics →

#### INNOVATION

## Un laboratoire à ciel ouvert

**Les Français s'expriment majoritairement pour une amélioration des conditions de vie en élevage. C'est dans ce but qu'a été créé le laboratoire d'innovation territorial Ouest Territoires d'Élevage [LIT Ouesterel].**

**Cofondé par INRAE, Terrena et Triskalia, il crée un lien entre la recherche et les porteurs d'enjeux [éleveurs, industrie, association de consommateurs, citoyens...] qui coconstruisent, testent et objectivent des innovations destinées à l'amélioration du bien-être animal.**

**Ainsi, le projet WAIT4, qui sera lancé en janvier 2023,**

**va tester durant 5 ans des dispositifs d'acquisition automatique de données sur les animaux et l'environnement d'élevage.**

**L'objectif : développer des indicateurs d'évaluation, notamment en réponse à des pratiques d'élevage innovantes, de changement de l'alimentation, ou d'adaptation au changement climatique. Impliqué dans ce projet, le LIT Ouesterel, dans une démarche de science ouverte et participative, va assurer le transfert des résultats aux parties prenantes et recueillir leurs conseils, critiques et suggestions, afin d'orienter les recherches.**

#### AGRICULTURE ET NUMÉRIQUE

## Un livre blanc pour montrer la voie

**Accordés sur l'objectif commun de « tirer le meilleur parti du numérique et contribuer à la transition vers des agricultures et des systèmes alimentaires durables », INRAE et Inria ont précisé dans un livre blanc\* leurs priorités de recherche, à savoir : → Fournir des outils numériques pour la gestion**

**collective à l'échelle des territoires .**  
→ Aider les agriculteurs dans la conduite individuelle des itinéraires techniques.  
→ Transformer les relations entre acteurs dans les filières .  
→ Créer et partager des données et des connaissances.

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

FRANCE 2030

## Conjuguer agroécologie et numérique

Les projets de recherche et infrastructures soutenus dans le cadre du Programme et équipements prioritaires de recherche (PEPR) Agroécologie et numérique répondront à quatre axes priorités :

- STRUCTURER un socioécosystème favorable à la recherche et à l'innovation responsable.
- CARACTÉRISER les ressources génétiques pour évaluer leur potentiel pour l'agroécologie.
- CONCEVOIR les nouvelles générations d'agroéquipements.
- DÉVELOPPER les outils et méthodes numériques pour l'analyse des données en agriculture, pour les agroéquipements et pour l'aide à la décision.

Ainsi, le PEPR a pour premier objectif de renforcer, par la production de connaissances, l'arsenal des outils destinés à la production et à l'exploitation des données numériques. Par exemple, pour caractériser plus rapidement et efficacement les ressources génétiques animales et végétales ou pour alimenter des modèles d'évaluation de l'impact des pratiques agroécologiques. Il s'agit aussi de construire avec les acteurs des filières de nouvelles générations d'agroéquipements numériques destinés à simplifier certaines tâches agricoles [outils robotiques, OAD...] et améliorer la santé et le bien-être animal [bâtiments connectés, capteurs...]. Un dernier objectif est de mesurer l'impact de ces innovations numériques sur l'environnement et sur les agriculteurs, tout en étudiant la place des politiques publiques dans ces changements de pratiques, et leur rôle dans l'accompagnement des acteurs qui les mettent en œuvre.

d'enseignement supérieur et organismes de recherche placés sous tutelle du ministre chargé de l'Agriculture, dont INRAE. L'institut Convergences #DigitAg porté par INRAE associe de multiples acteurs de la recherche et de l'enseignement, dont l'université de Montpellier dans un objectif pédagogique avec plus de 500 chercheurs et une centaine de thèses en cours. Enfin, les chambres d'agriculture, les opérateurs de compétences ou les instituts techniques proposent également des formations au numérique pour les agriculteurs.

### Une mobilisation de tous favorisée par les pouvoirs publics

Sur des enjeux aussi importants que ceux soulevés par l'alimentation durable, toute la société doit être mobilisée. Cette ambition du bien commun a fait bouger les frontières entre public et privé. De nouvelles interactions et de nouvelles dynamiques apparaissent. La transition nécessite de grosses infrastructures et des investissements conséquents. Avec le modèle agroécologique qui requiert une gestion au niveau du territoire, les collectivités montent en puissance. Engagé sur ce terrain, l'État a renforcé ses investissements en 2021 avec 1 milliard d'euros pour les start-up Foodtech ou Agtech<sup>2</sup>.

Son ambition? Remonter de la huitième à la troisième place dans la compétition mondiale, en s'appuyant et soutenant l'expertise nationale reconnue sur toute la chaîne alimentaire. Les investissements mondiaux dans la FoodTech et l'AgTech ont presque doublé en 2021. Pour arriver sur le podium, la France a en 2021 mis 200 millions d'euros sur la table en soutien aux start-up et poursuit son accompagnement, notamment dans le cadre du plan d'investissement France 2030<sup>3</sup>. En consacrant 2 milliards d'euros à l'objectif « pour une alimentation saine, durable et traçable » de ce plan, elle entend accélérer l'émergence de champions et de filières fortes dans ce domaine et accélérer la transition attendue.

Pour cela, le plan s'appuie sur de nouveaux dispositifs de recherche et innovation associant public et privé, notamment les Programmes et équipements prioritaires de recherche (PEPR) et les Grands défis. Parmi ceux-ci, deux s'emparent des questions numériques en lien avec l'agriculture.



© INRAE - Christophe Maître

### Un programme national pour une agriculture sobre et attractive

Doté d'un budget de 65 millions d'euros pour 8 ans, le PEPR Agroécologie et numérique, copiloté par INRAE et Inria, vise à fédérer les recherches de toutes disciplines à l'interface entre les deux trajectoires du numérique et de l'agroécologie, en associant les partenaires socioéconomiques. L'objectif est d'orienter le développement du numérique pour servir l'agroécologie. Pour cela, il ambitionne d'identifier les développements spécifiques nécessaires et d'analyser leurs impacts, afin de favoriser la sobriété d'une part, et de renouveler l'attractivité du secteur agricole d'autre part.

### Robotique, un grand défi pour des solutions adaptées

Précurseuse avec les robots de traite en 1992, la France a perdu du terrain dans le domaine des agroéquipements. Notre pays entend bien retrouver une belle place sur un marché de 8 milliards<sup>4</sup> d'euros en 2021 et estimé à 18 milliards dès 2025. Le Grand défi Robotique validé en juillet 2022 en cohérence avec le PEPR Agroécologie et numérique y contribue. Copiloté par l'association

↑  
Grâce aux capteurs embarqués sur son tracteur, cet agriculteur peut automatiser le binage de ces parcelles.

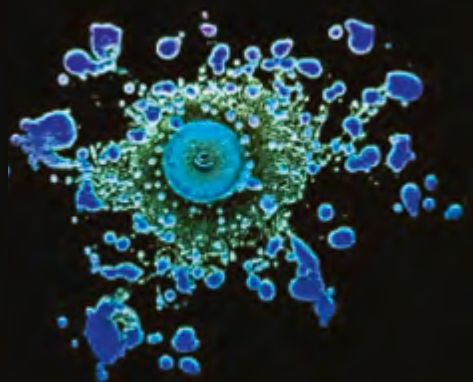
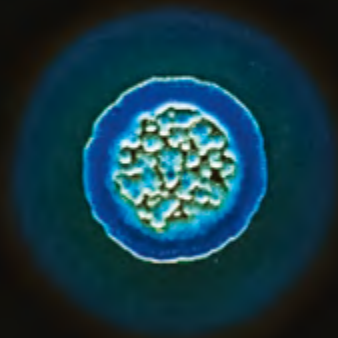
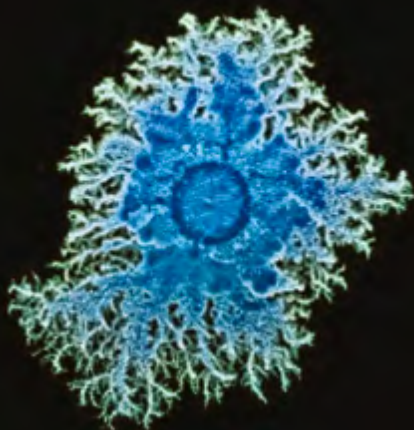
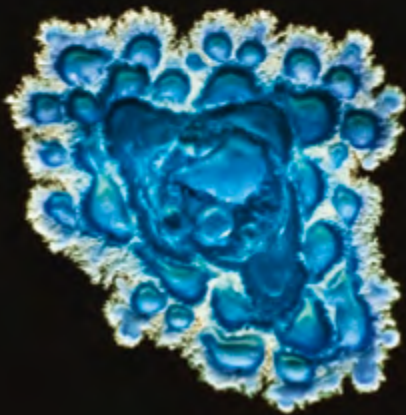
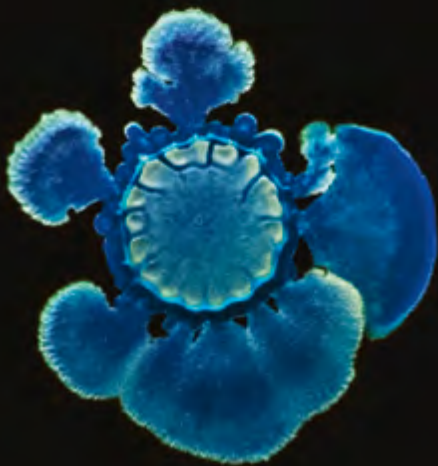
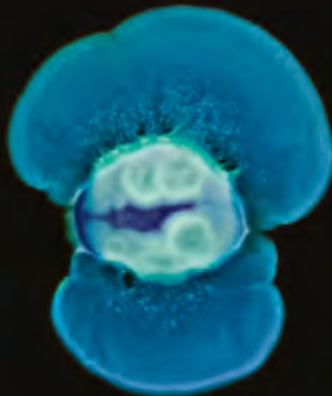
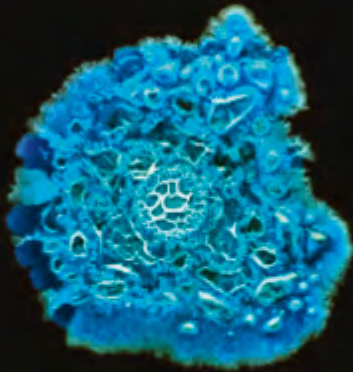
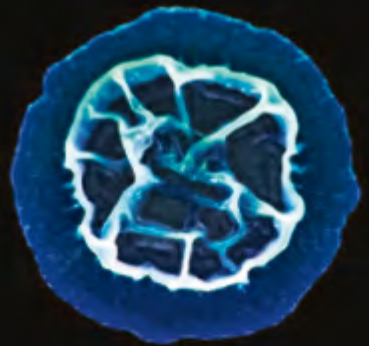
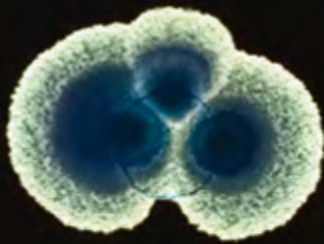
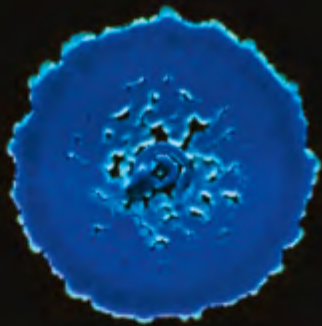
RobAgri et INRAE, il réunit chercheurs, industriels, pôles de compétitivité et fédérations agricoles pour structurer une filière nationale émergente, prometteuse, sur les solutions robotiques en réponse aux besoins de l'agroécologie et en accélérer la diffusion et le développement. Leurs axes prioritaires? Concevoir de nouvelles pratiques, développer de nouvelles technologies, des outils avec des référentiels partagés et en faciliter l'appropriation. Il s'appuiera sur l'AgroTechno-Pôle situé à Montoldre (03) où ces différents acteurs apprendront à dialoguer et expérimenteront afin de lever les verrous persistants et proposer une vision partagée du nouveau visage de l'agriculture. ●

2. [url.inrae.fr/3SXVqAV](http://url.inrae.fr/3SXVqAV)  
3. [bit.ly/3EMAmK3](http://bit.ly/3EMAmK3)  
4. Source FIRA, 2021.



# LE POTENTIEL INSOUPÇONNÉ DES ALIMENTS FERMENTÉS

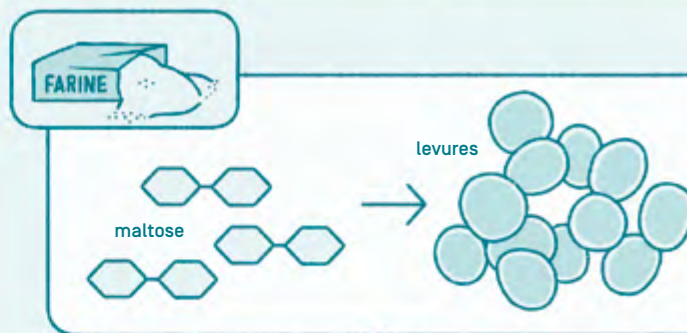
La fermentation, procédé ancestral de préservation des aliments, repose sur l'activité de microorganismes qui empêchent le développement de bactéries pathogènes, mais aussi génèrent de nouvelles propriétés sensorielles et nutritionnelles. Sains, durables et dotés d'un potentiel inexploré, les aliments fermentés pourraient bien occuper une place de choix dans l'alimentation de demain, en particulier pour « végétaliser » les régimes occidentaux.



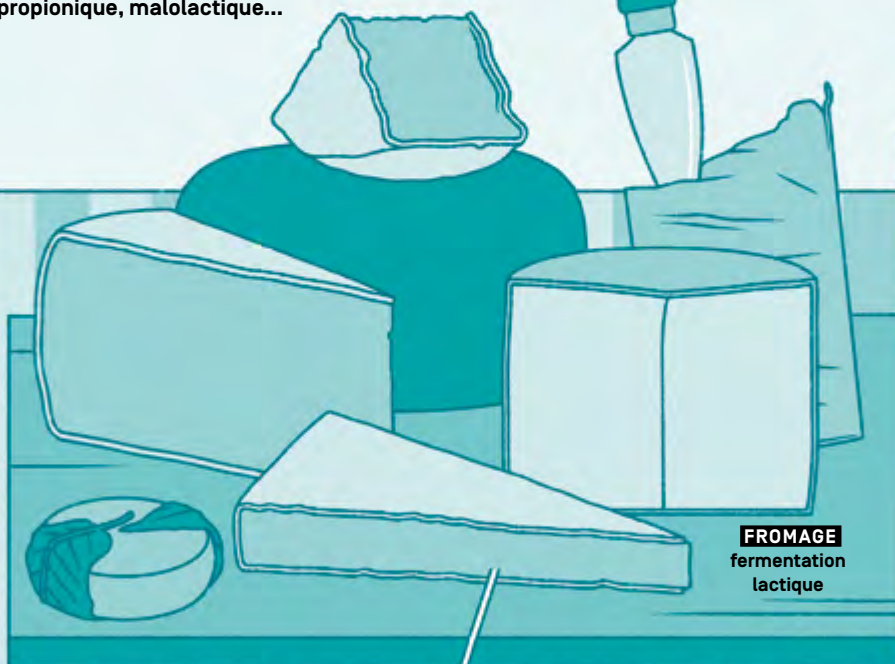


# Le processus de fermentation

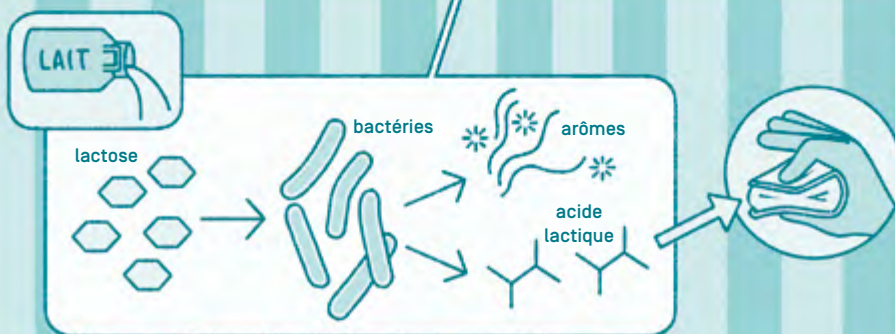
La fermentation est un processus qui transforme le sucre en acide grâce à l'action de microorganismes (bactéries, levures, moisissures). La production d'acide entraîne une diminution de pH de l'aliment qui empêche le développement de bactéries pathogènes ou de moisissure. Cette réaction chimique libère d'autres composés selon le type de fermentation : arômes, alcool, CO<sub>2</sub>, vitamines, acides gras, etc. Deux types de fermentation sont bien connues, la fermentation lactique et la fermentation alcoolique mais il en existe bien d'autres : acétique, butyrique, propionique, malolactique...



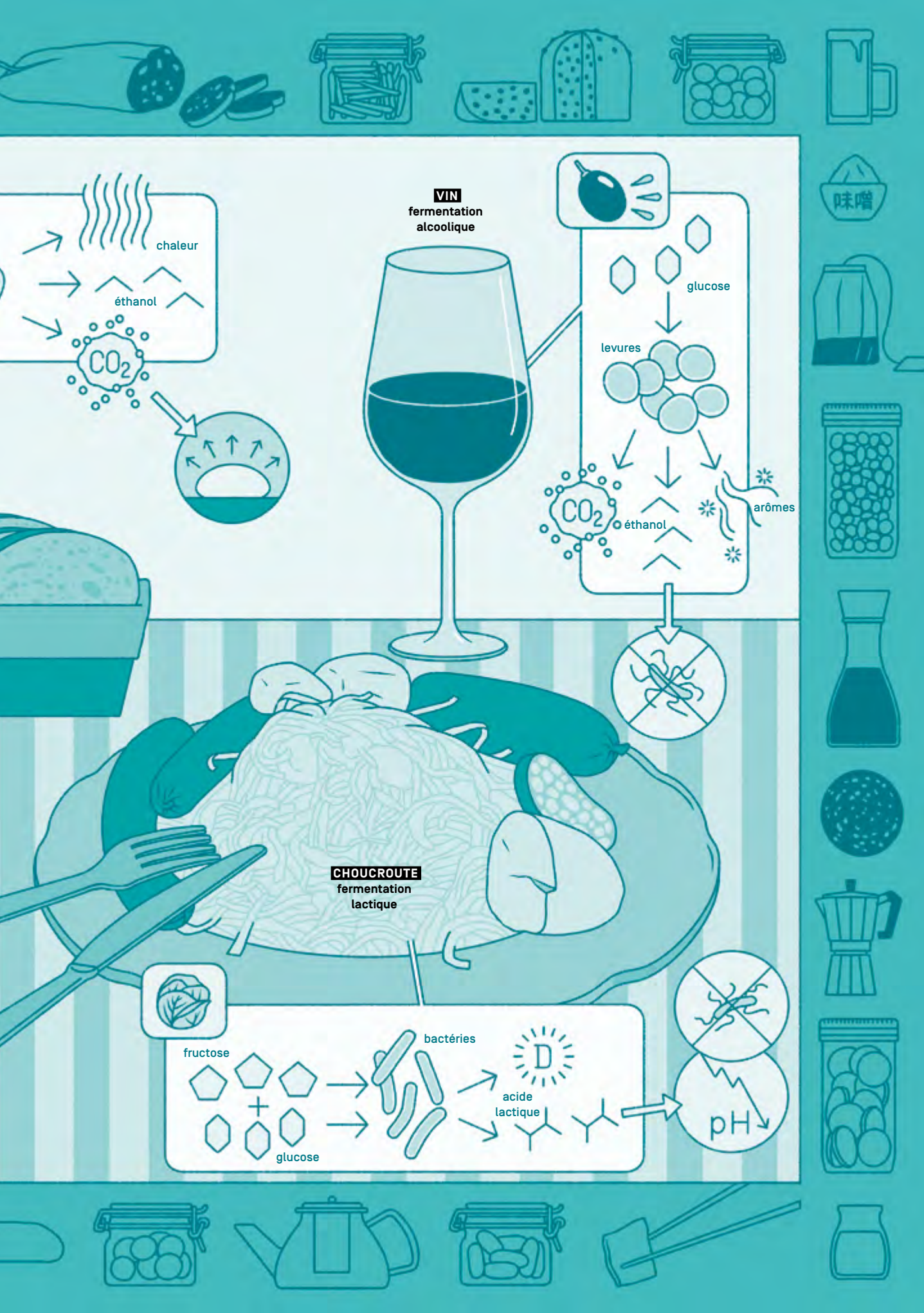
**PAIN**  
fermentation alcoolique



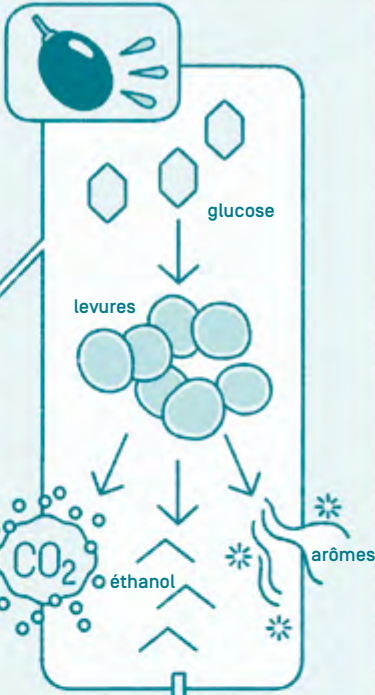
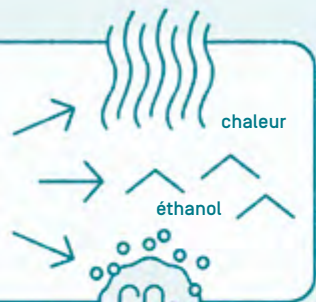
**FROMAGE**  
fermentation lactique



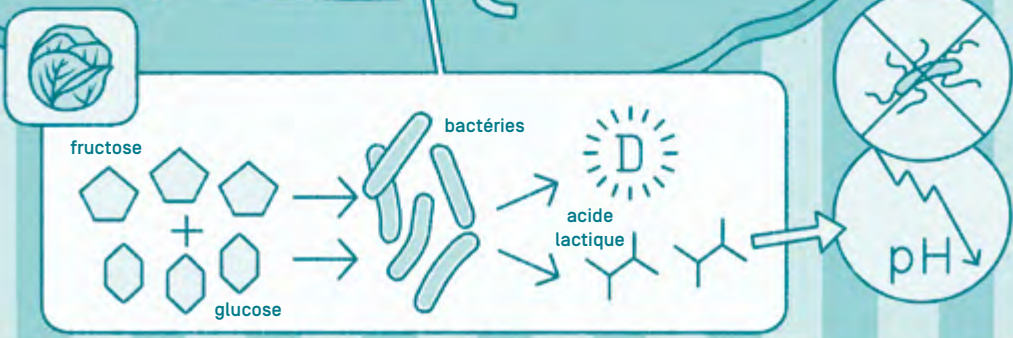




**VIN**  
fermentation  
alcoolique



**CHOUCRROUTE**  
fermentation  
lactique



# MANGER FERMENTÉ, MANGER DURABLE ?

Revenir à des procédés plus naturels pour conserver nos aliments et leur donner du goût serait une des clés des transitions vers une alimentation plus durable pour les pays qui doivent intégrer plus de végétal dans leur assiette.

## Le b.a.-ba de la fermentation.

Fermentez du jus de raisin, vous obtiendrez du vin, fermentez de la farine avec de l'eau vous obtiendrez du pain, fermentez du lait vous obtiendrez des yaourts ou du fromage. Pain, vin, fromage, yaourts, mais aussi choucroute, cornichons, saucissons, olives..., les aliments fermentés sont très souvent dans nos assiettes ou dans nos verres. Parfois même sans que nous le sachions : le thé, le café, le chocolat sont aussi issus de la fermentation. Ce procédé ancestral, qui a été industrialisé dans les années 1970, revient aujourd'hui sur le devant de la scène avec, comme atouts, plus de naturalité et de durabilité. Se passer d'additifs, développer de nouveaux arômes, créer de nouveaux aliments..., la fermentation offre un poten-

**5 000**  
aliments  
fermentés sont  
produits et  
consommés  
dans le monde

Entre 1 million et  
plusieurs milliards  
de microorganismes  
par gramme  
d'aliment fermenté

tiel extraordinaire. Bienvenue au cœur des recherches pour l'alimentation de demain. Mais commençons par le commencement.

### De la connaissance empirique à l'industrialisation

On vous parle d'un temps que même les plus de 20 ans ne peuvent pas connaître ! Un temps où les réfrigérateurs et congélateurs n'existaient pas pour conserver les aliments, un temps où les conserves n'avaient pas encore été inventées. Et pourtant, il y a des milliers d'années, comme aujourd'hui, il fallait bien trouver un moyen pour que les récoltes de l'été puissent nourrir toute l'année. Le moyen ? La fermentation ! Les pre-

### LA DOMESTICATION DES FERMENTS EN QUELQUES DATES

Il y a des milliers d'années, les êtres humains utilisaient déjà la fermentation pour stocker et conserver les récoltes de l'été mais également pour fabriquer des produits alcoolisés.

### Néolithique

Tout autour du globe, les êtres humains ont peu à peu appris à conserver leurs aliments.

### - 13 000

Les premières traces d'aliments fermentés sont retrouvées sur le pourtour méditerranéen

mais aussi au Moyen-Orient (2000 ans avant J.-C.) et en Chine (300 ans avant J.-C.).

### - 6 000

Des analyses chimiques ont détecté des traces de vins dans des jarres retrouvées en Géorgie.

mières traces d'aliments fermentés remontent à 13 000 avant J.-C. sur le pourtour méditerranéen, 2 000 avant J.-C. au Moyen-Orient et 300 avant J.-C. en Chine. Quant au vin, les plus anciennes jarres, retrouvées en Géorgie (Moyen-Orient) sont datées d'environ 6 000 ans avant J.-C.

Pendant de nombreux siècles la fermentation était considérée comme une action de décomposition. C'est seulement en 1857 que Louis Pasteur démontre que la fermentation est le résultat de l'action d'organismes vivants, les levures et bactéries. Il met en lumière les mécanismes biochimiques du processus en particulier de la fermentation alcoolique du vin et de la betterave. Ce n'est que dans les années 1960/1970 que la fermentation se développe à une échelle industrielle, en particulier pour les produits laitiers comme les yaourts. L'objectif est alors de stabiliser le processus, de mieux le contrôler, le maîtriser et le standardiser avec la volonté in fine d'assurer la sécurité sanitaire de ces aliments en empêchant la prolifération de bactéries pathogènes. « *L'industrialisation de la fermentation a permis de fiabiliser le procédé et ainsi d'éviter des pertes causées par d'éventuelles fermentations spontanées et indésirables* », précise Sylvie Dequin, cheffe du département Microbiologie et chaîne alimentaire (MICA) d'INRAE.

### L'art de fermenter

Fermenter c'est simple. Prenez une matrice – fruit, légume, viande, céréale, légumineuse –, ajoutez des ferments – levures ou bactéries – et vous obtenez un nouvel aliment avec un goût, une texture et une composition nutritionnelle différents. Comment cela fonctionne-t-il ? En l'absence d'oxygène, les microorganismes, via l'action de leurs enzymes, dégradent le sucre (glucose, lactose, maltose, etc.) contenu dans l'aliment et produisent de l'acide ou de l'alcool mais également d'autres composés, du dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>), des arômes ou des vitamines par exemple. La production d'alcool,

### LEVURE OU BACTÉRIE ?

Les deux sont des organismes avec une seule cellule, mais la levure, de la famille des champignons, possède des éléments cellulaires (un noyau, des mitochondries...) dont les bactéries sont dépourvues.

### NE DITES PLUS LEVURE CHIMIQUE !

La levure est un champignon unicellulaire, il en existe plusieurs espèces, les plus connues sont du genre *Saccharomyces* responsables de la fermentation de la bière ou du pain. Le terme de levure chimique est utilisé – à mauvais escient – pour désigner une poudre à lever qui a certaines propriétés de la levure vivante (production de CO<sub>2</sub>), mais dont le processus, qui fait uniquement intervenir des réactions chimiques, n'a rien à voir avec la fermentation !

aux propriétés antimicrobiennes, ou d'acide qui va abaisser le pH du milieu empêchant les bactéries pathogènes de se développer, confère aux produits fermentés l'avantage de se conserver... sans conservateurs ! Il existe de nombreux types de fermentations. La fermentation lactique permet la production de yaourts, fromages ou choucroute. La fermentation alcoolique est réalisée par certaines levures qui dégradent le sucre du jus de raisin et produit de l'alcool (éthanol), du dioxyde de carbone et de nombreux composés aromatiques qui font toute la richesse gustative des vins. La fermentation acétique transforme le vin en vinaigre. La fermentation propionique permet d'obtenir les fromages à pâte cuite chez qui la libération de gaz carbonique est à l'origine des « trous » du gruyère ou de l'emmental. Fermentations malolactique, butyrique... toutes ces fermentations dépendent des microorganismes impliqués, des enzymes produites (protéines responsables de réactions chimiques) et des substrats présents dans la matrice. Avec potentiellement une infinité de combinaisons.

### Manger fermenté, levier de la durabilité

Pourquoi la fermentation revient-elle sur le devant de la scène et dans nos labos ? « *Avec le fromage, la charcuterie, le pain, le vin, la bière... les aliments fermentés ont toujours eu une part majeure dans l'alimentation des Occidentaux. Ce qui est nouveau c'est la fermentation d'autres fruits et légumes et le potentiel de nouvelles assiettes végétales qu'elle promet* », explique Catherine Renard, cheffe adjointe du département Aliments, produits biosourcés et déchets d'INRAE. En effet, un des facteurs clés d'une alimentation plus durable dans les pays occidentaux est de rééquilibrer les apports en protéines à 50/50 en origine animale et végétale alors qu'elles sont aujourd'hui consommées dans une proportion de 60/40. L'enjeu est donc de mettre plus de végétaux dans notre assiette. Pour séduire le →

## 1789

Antoine Lavoisier consacre une part importante de ses recherches à la nature des fermentations.

## 1857

Les travaux de Louis Pasteur révolutionnent le procédé de fermentation. La compréhension du processus et la

sélection de ferments appropriés permettent une fermentation plus rapide, plus stable et plus prévisible.

## 1970

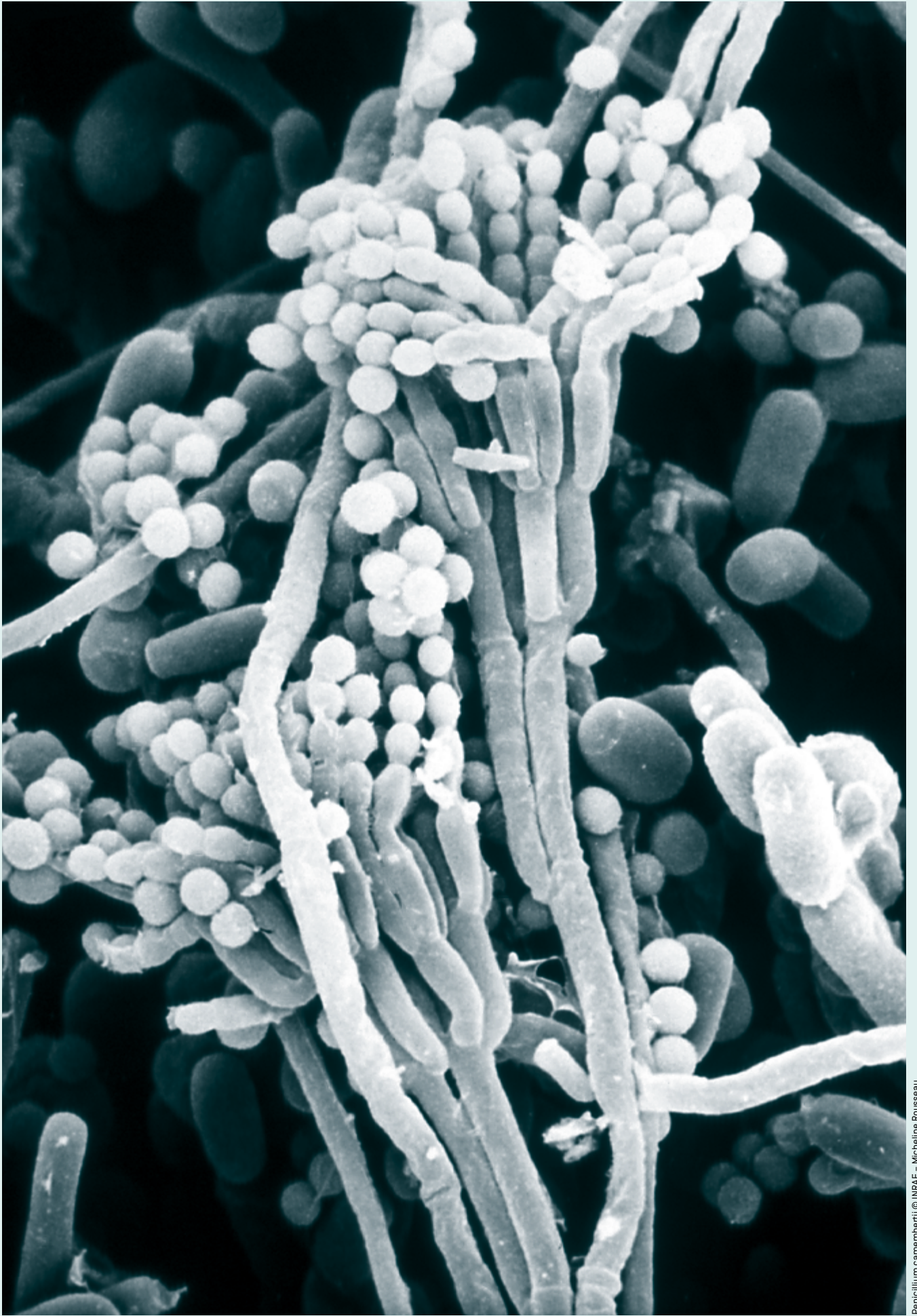
Le procédé entre dans une nouvelle ère : les microorganismes sont utilisés à l'échelle industrielle et

notamment dans l'industrie alimentaire.

## 2022

Ce sont quelque 5 000 aliments fermentés qui sont consommés dans le monde.





consommateur en quête de naturalité, fermenter des fruits et légumes leur conférant des goûts et des textures nouvelles tout en utilisant un procédé naturel est une piste très prometteuse. Fermenter des végétaux pour les conserver, c'est se passer d'additifs dans les aliments, c'est un procédé naturel qui demande peu d'équipement lourd. C'est aussi un procédé antigaspillage. Chez soi d'abord pour conserver sa production ou ses achats de fruit et de légumes, mais aussi chez les maraîchers, leur offrant de nouveaux débouchés, en particulier avec les fruits et légumes qui ne seraient pas au bon calibre. Ce serait également un moyen de conserver les récoltes à durée courte et qui sont parfois gaspillées faute de temps pour les vendre. Enfin, on peut également imaginer la fermentation de coproduits de l'agriculture ou de l'agroalimentaire. C'est ce qu'étudient les scientifiques de l'unité INRAE Sécurité et qualité des produits d'origine végétale (SQPOV) à Avignon dans le cadre du projet européen Demeter (Use of dietary fibre from pomaces of second class vegetables as food ingredient). Ils travaillent avec une légumerie pour étudier la fermentation de coproduits de fruits et légumes, permettant de les valoriser et d'éviter du gaspillage. Par exemple, les chercheurs regardent si fermenter des épluchures de légumes, riches en microconstituants d'intérêt (vitamines, minéraux, antioxydants, etc.) permettrait de stabiliser des produits qui peuvent vite s'altérer.

Durable c'est certain. Des nouvelles propriétés de texture et de goût, aussi. Qu'en est-il de l'impact santé de ces aliments? ●

**Fermenter des végétaux, c'est se passer d'additifs pour les conserver : un procédé naturel qui demande peu d'équipement lourd.**

## ÉVOLUTION

## Sélection chez les ferments

**Depuis des millénaires, les humains, sans le savoir, ont utilisé la capacité des microorganismes à fermenter les fruits, les légumes, la viande, le poisson et les céréales pour produire des boissons alcoolisées, du pain, des légumes fermentés et de la charcuterie.**

**Au fil des siècles, ces fermentations ont conduit à une sélection de souches, privilégiant les plus efficaces et modifiant des espèces telles que les levures de vin, de bière ou de pain. Elles ont alors acquis de nouvelles caractéristiques par rapport à leurs ancêtres sauvages et peuvent être considérées maintenant comme des espèces domestiquées.**

**Les scientifiques, grâce aux approches de génomique comparative développées ces dernières années, ont mis en évidence les mécanismes moléculaires ayant contribué à l'évolution adaptative des génomes de ces microorganismes. « Un exemple remarquable issu des travaux de l'unité Sciences pour l'œnologie (SPO) est celui des levures *Saccharomyces cerevisiae*, utilisées dans la fermentation du vin, qui via un transfert de gènes provenant d'une levure éloignée génétiquement, ont acquis**

**la capacité à mieux utiliser les ressources azotées du moût de raisin et ainsi aider au bon déroulement de la fermentation », explique Sylvie Dequin. « C'est une sélection naturelle des espèces qui s'est faite pour s'adapter aux procédés développés par l'Homme. »**

**Des évolutions qui participent à la biodiversité des microorganismes dont on mesure aujourd'hui toute l'importance, notamment pour maintenir la diversité de notre microbiote intestinal.**

**Dans le cadre du projet de recherche participative Bakery, les scientifiques, avec l'aide des boulangers et paysans boulangers, ont mis en évidence une grande diversité de microorganismes dans les levains français. Alors qu'on pensait que seule la levure *Saccharomyces cerevisiae* était dans le levain des boulangers, les scientifiques y ont découvert 12 souches de levures et 19 espèces de bactéries !**

**Une biodiversité essentielle en lien avec les différentes variétés de blés cultivées et qui serait responsable des différentes qualités nutritionnelles et différents goûts du pain.**

## SÉCURITÉ ALIMENTAIRE

### La fermentation comme option

Dans le monde merveilleux des microorganismes, il y a les gentils et les méchants. Les méchants, ce sont les bactéries pathogènes, par exemple *Listeria monocytogenes*, responsable de la listériose, ou les salmonelles, responsables de toxi-infections alimentaires. Les gentils, ce sont les bactéries et levures utiles, celles qui donnent leurs caractéristiques aux aliments (arômes, texture, etc.) ou simplement permettent de mieux les conserver. Celles, également, qui peuplent nos intestins, et forment le microbiote intestinal dont le rôle dans le maintien d'un bon état de santé a été démontré. Comme dans toutes les belles histoires, ce sont (presque) toujours les gentils qui gagnent... c'est le cas pour la fermentation : l'action des bactéries ou des levures utiles empêche généralement le développement de microorganismes pathogènes, et cela de façon tout à fait naturelle.

## RECHERCHE PARTICIPATIVE

### La fermentation au quotidien

La fermentation des légumes par les consommateurs connaît un fort engouement ces dernières années. Quelles sont leurs pratiques ? Quels légumes fermentent-ils ? Leurs productions maison sont-elles sécuritaires ?

Le projet de recherche participative Flegme, initié fin 2019 et porté par le pôle de compétitivité Vegepolis Valley et INRAE, a suivi les pratiques de production, mais aussi de consommation, de 250 citoyens fermenteurs. Les scientifiques d'INRAE ont collecté et analysé 75 échantillons de légumes fermentés à la maison. Résultats : plus de 30 légumes différents ont été fermentés, des choux, des carottes, des betteraves... mais aussi des légumes moins connus tels que la chayotte. *« Nous avons collecté autant de recettes que d'échantillons ! Certains ont fait des mélanges de légumes, d'autres ont ajouté des condiments ou des épices »*, explique Florence Valence, responsable du Centre international de ressources microbiennes « Bactéries d'intérêt alimentaire » (CIRM-BIA) à l'unité Science et technologie du lait et de l'œuf (STLO). Et bonne nouvelle, aucun échantillon ne contenait de bactéries pathogènes. Un deuxième volet du projet Flegme consiste à déterminer l'impact des facteurs de fabrication, tels que la quantité de sel ou la façon dont les légumes sont découpés, sur le processus de fermentation. *« L'objectif était de faire une fabrication contrôlée avec un plan d'expérience, sur le chou et la carotte, pour regarder comment*

*ces facteurs ont un impact sur les écosystèmes bactériens et leur cinétique. »* Ce travail, mené en collaboration avec deux industriels (CTCPA et Protial) montre qu'au début de la lactofermentation [fermentation de légumes avec du sel], ce sont des entérobactéries qui se développent, des bactéries plutôt pathogènes, rapidement contrées par les bactéries lactiques, confirmant ainsi leur effet protecteur et conservateur. En fin de processus, l'écosystème est dominé par les bactéries lactiques, les bactéries pathogènes n'étant plus retrouvées vivantes dans les échantillons. Cette étude a permis de montrer que le degré de découpe des légumes avait un impact sur la fermentation. Pour le chou, la fermentation est mieux maîtrisée s'il est émincé comparé aux feuilles entières. Nous avons montré également que la concentration de sel de 1% usuellement utilisée pouvait être réduite à 0,8% sans impact notable sur la fermentation. Enfin, les porteurs du projet ont travaillé avec des sociologues pour comprendre les freins et les motivations à la consommation de légumes lactofermentés. Ainsi l'atout "fait maison" combiné à l'image santé souvent associée aux légumes lactofermentés ressortent parmi les premiers facteurs de motivation à en consommer. Un travail a également été conduit avec des lycées professionnels mais aussi des restaurateurs pour élaborer des recettes à base de légumes fermentés. *« Ce procédé n'est pas nouveau, mais il y a encore un travail pour faire connaître et apprécier ces légumes aux consommateurs. On constate qu'il y a une réelle méconnaissance des citoyens sur ce qu'est un aliment fermenté et sur le fait qu'ils ingèrent des microorganismes vivants »*, conclut Florence Valence.



# Fermentation des aliments, voyage autour du monde



Les aliments fermentés sont présents dans l'alimentation sur toutes les zones du globe. Ils répondent à des enjeux différents.

**PAYS OCCIDENTAUX**  
Il s'agit de rééquilibrer les apports entre protéines animales et végétales et développer de nouveaux produits fermentés à base de végétaux.

**AFRIQUE**  
La fermentation des céréales est un enjeu fort pour assurer la sécurité alimentaire des populations. Il s'agit alors de sécuriser davantage les procédés pour limiter les pertes.

**ASIE**  
Manger des végétaux fermentés est très ancré dans la culture. Les Asiatiques ont des savoir-faire empiriques, l'enjeu pour eux est de développer des procédés plus sécurisés.

Si l'alimentation fermentée semble être un levier de la durabilité, elle a également d'autres vertus. Le processus de fermentation ne se limite pas à la préservation des aliments et à la création de nouvelles textures et d'arômes, il produit également des propriétés qui pourraient avoir un impact positif sur la santé. **Explications.**

# LES 4 ATOUTS DES ALIMENTS FERMENTÉS

Lorsqu'un aliment est fermenté, ses propriétés sont modifiées et cela a des effets sur la structure physico-chimique de sa matrice alimentaire. Les microorganismes présents dans l'aliment fermenté produisent des molécules, appelées métabolites, qui peuvent dans certains cas avoir des effets santé, tels que la production de vitamine C dans la choucroute par exemple. Ils peuvent aussi agir en enrichissant la diversité des microorganismes au sein du microbiote de celui qui les mange, élément essentiel de la santé humaine (voir Ressources #2). **Tour d'horizon des atouts des aliments fermentés.**

01

COMPOSITION

## Plus de vitamines et d'acides gras

Les aliments fermentés renferment, par définition, une multitude de microorganismes, plusieurs millions voire milliards. Cet écosystème produit des molécules soit directement soit en interaction avec les composants de la matière de l'aliment (protéines, lipides, etc.). Ainsi, l'aliment fermenté est, dans sa composition, très différent de l'aliment de base. Et pour certains aliments, sa nouvelle composition

est intéressante nutritionnellement, c'est le cas pour les produits laitiers dans lesquels les bactéries propioniques permettent la synthèse de vitamines B12. Dans la choucroute, la teneur en vitamine C est supérieure à celle du chou. Aussi, certains microorganismes produisent lors de la fermentation des acides gras à chaîne courte, source d'énergie, mais qui sont également des précurseurs de composés aromatiques.





## BACTÉRIES

## Tout un fromage

À INRAE, les scientifiques étudient la biopréservation pour le fromage au lait cru pour lequel le risque de contamination par des microorganismes pathogènes est important. L'histoire commence dans les années 2000 lorsque l'unité Fromage, à Aurillac, a mis en évidence l'action de la bactérie *Lactococcus garvieae* pour empêcher le développement de la bactérie pathogène *Staphylococcus aureus* dans les fromages à pâte pressée non cuite. Ensuite, l'unité s'est intéressée au développement de *Listeria monocytogenes* et des *Escherichia coli* producteurs de shigatoxines dans les fromages au lait cru et a mis en évidence des souches ou des consortia inhibiteurs de ces pathogènes. « On travaille sur des consortia, c'est-à-dire l'association de deux ou trois souches qui agissent en synergie et cela entraîne une inhibition encore plus forte », indique Cécile Callon. Mais pour utiliser des bactéries en biopréservation, il y a une règle à respecter : « Le microorganisme doit être sain et ne pas avoir d'incidence sur la santé du consommateur. Pour cela on regarde s'il n'a pas des gènes de virulence ou de résistance aux antibiotiques avant de l'utiliser en tant que ferment », rappelle-t-elle. L'enjeu est d'avoir une approche globale et de considérer toute la chaîne alimentaire : « On pourrait même envisager d'inoculer certaines souches dans les animaux pour qu'elles se retrouvent dans le lait. » Enfin, les travaux de l'unité Fromage concernent aussi l'étude de l'impact de l'inoculation de ces ferments dans le lait sur les communautés microbiennes de l'aliment pour s'assurer que ces ferments n'ont pas d'impacts sensoriels ou autres sur les produits finis.

## 02

## CONSERVATION

## Des capacités naturelles

Lorsque les microorganismes dégradent les sucres de l'aliment, ils libèrent des acides (lactique, acétique, etc.), ou de l'alcool dans le cas de la fermentation alcoolique, qui inhibent la croissance d'autres microorganismes pathogènes (ou responsables d'altérations) pouvant se développer dans les aliments. Certains microorganismes produisent en outre des composés appelés bactériocines qui empêchent le développement de bactéries pathogènes. On peut amplifier ce phénomène de conservation naturelle par des méthodes de biopréservation ou bioconservation qui consistent à ajouter des microorganismes, appelées cultures protectrices, dans les aliments. Ils peuvent aussi

retarder le développement des microorganismes qui altèrent les aliments et permettre ainsi de les conserver plus longtemps. De nombreuses études ont cherché à décrire et comprendre les mécanismes impliqués qui se sont révélés être multiples et, pour certains, relativement complexes. « C'est le cas pour une souche d'*Hafnia alvei*, très inhibitrice des *Escherichia coli* dans les fromages, dont on n'a pas encore élucidé le mécanisme d'action ! », explique Cécile Callon, ingénieure de recherche à l'unité Fromage, à Aurillac. On peut également rajouter dans certains aliments des bactéries sélectionnées qui vont améliorer leur conservation, sans les transformer en un autre produit. Ou encore, lors de la vinification, on peut sélectionner les souches qui produisent moins de sulfites. Tout cela avec un même objectif, se passer d'additifs de synthèse ou limiter la production de molécules indésirables.

## 03

## TOXICITÉ

## Moins de composés indésirables

L'activité des microorganismes contenus dans les aliments fermentés peut, dans certains cas, réduire la toxicité de ceux-ci. Citons les composés cyanogènes, à l'origine du cyanure. Présents dans le manioc mais dégradés via un processus de fermentation, ils sont rendus tout simplement inoffensifs et comestibles. C'est vrai également pour la modification de certains composés initialement allergènes et devenus inactifs.

## RECHERCHE

## Des cohortes sous surveillance

Pour évaluer l'impact santé des aliments fermentés, l'étude **Nutrinet santé portée par l'Équipe de recherche en épidémiologie nutritionnelle [Eren] suit plus de 160 000 adultes sur leurs habitudes alimentaires, leur mode de vie et leur santé. Récemment, les scientifiques de Nutrinet santé ont montré qu'une consommation de produits laitiers fermentés à raison d'au moins 160 g/j était associée à une diminution du risque de maladies cardiovasculaires comparé à une consommation de moins de 57 g/j. Cette association n'a pas été mise en évidence pour les produits laitiers non fermentés.**

## Des micro-organismes pour le microbiote

Dans notre corps, nous vivons en symbiose avec une multitude de microorganismes. Ces microorganismes forment des microbiotes. Depuis plusieurs années, les scientifiques ont mis en évidence que les interactions que nous entretenons avec les microorganismes de notre intestin ont des liens forts avec notre santé et que leur nombre et leur diversité sont déterminants. Un moyen pour entretenir la richesse de notre microbiote intestinal, outre une alimentation diversifiée, est d'ingérer des microorganismes vivants, bactéries ou levures, ce que permet l'ingestion d'aliments fermentés. Pour comprendre davantage les liens entre la consommation d'aliments fermentés, le microbiote et notre santé, un nouveau projet de recherche participative, Le French Gut\* a débuté en septembre 2022. Ce projet ambitionne d'analyser le microbiote français en fonction des habitudes alimentaires et en collectant 100 000 échantillons de selles d'adultes résidant en France, associés à un questionnaire de santé et de nutrition.

\*<https://lefrenchgut.fr>

## Manger des aliments fermentés contribue à la richesse de notre microbiote.

### FOCUS

## Le goût du vin

Notes boisées, notes de fruits rouges, arômes de fruits exotiques..., non, ce vocabulaire sophistiqué d'œnologie n'est pas là que pour briller en société ! Ces arômes sont bien réels, il en existe des milliers et sont le résultat de l'action des levures. Mais comment expliquer cette grande diversité d'arômes ? La diversité du raisin bien sûr... mais pas seulement ! « La production d'arômes dépend de la souche de levure en jeu. Selon la souche, elles vont produire plus ou moins d'arômes avec des profils très différents », explique Carole Camarasa, directrice de recherche à l'unité Sciences pour l'œnologie [SPO]. Existerait-il alors une recette qui permettrait de choisir le raisin et la levure pour obtenir les arômes souhaités ? Vous vous en doutez, ce n'est pas si simple ! 90 % des vins sont obtenus par fermentation avec la levure *Saccharomyces cerevisiae*. Mais dans le raisin récolté il y a d'autres microorganismes qui interviennent au début du processus et dont la croissance est inhibée par l'alcool formé. Or seule *Saccharomyces cerevisiae* survit en présence d'éthanol et peut ainsi terminer le processus de fermentation. « C'est pour cela que dans l'industrie du vin, l'ajout de cette levure est quasiment systématique pour s'assurer d'avoir une fermentation complète, mais son utilisation systématique freine le développement d'autres levures et ainsi limite le profil aromatique des vins », explique Carole Camarasa. L'enjeu pour la recherche est de tester l'introduction d'autres espèces de levures en début de procédé et de favoriser leur développement. Les bonnes

candidates : *Torulaspora delbrueckii* et *Starmaerella bacillaris*. Vous voulez du vin avec des arômes de fruits exotiques ou de fruits de la passion ? Mettez la levure *Metschnikowia pulcherrima* qui possède des enzymes bêta-lyases permettant de libérer des thiols responsables de ces arômes très recherchés en œnologie.

Une autre piste, regarder les profils génétiques et faire le lien entre gènes et production de tel ou tel arôme. « En faisant des croisements, on peut réussir à obtenir les bons gènes dans les levures en fonction du profil aromatique que l'on souhaite. » Ces dernières années l'unité SPO a identifié plusieurs allèles [variants d'un gène] qui influencent la production de métabolites, en particulier des esters, participant à l'arôme des vins. On peut également limiter la production d'arômes négatifs. L'unité SPO a mené des travaux sur le sulfure d'hydrogène responsable de l'odeur d'œuf pourri. Les scientifiques ont identifié deux gènes responsables de cette molécule. Ces résultats sont utilisés par les producteurs de levures pour sélectionner les souches dépourvues de ces gènes. Mais la génétique ne fait pas tout, plusieurs paramètres entrent en jeu dans la formation des arômes. « Nous avons identifié trois facteurs clés : la quantité d'azote disponible, l'oxygénation et la quantité de lipides, les acides gras étant des précurseurs des composés aromatiques. La température influence également le processus ainsi que la nutrition des levures au cours de la fermentation. » De quoi mener encore de nombreuses années de recherches pour le plus grand plaisir de nos papilles... et de notre nez !







## Les aliments fermentés, bons pour la santé ?

Entretien avec Marie-Christine Champomier-Vergès,  
directrice de recherche à l'unité Micalis à Jouy-en-Josas

Micalis est une unité mixte de recherche (UMR) associant INRAE et AgroParisTech, et faisant partie de l'université Paris-Saclay (UPSaclay). Sa mission est le développement de recherches novatrices dans le champ de la microbiologie de l'alimentation au service de la santé.

### Peut-on dire que les aliments fermentés sont bons pour la santé ?

Il est difficile d'affirmer que les aliments fermentés sont meilleurs pour la santé par rapport à d'autres car la consommation de ces aliments s'inscrit dans un régime alimentaire global difficile à fragmenter. Ce qui est sûr, c'est que leurs spécificités – le fait de contenir des microorganismes vivants, le fait que ces microorganismes ont pu transformer les matrices alimentaires et produire des métabolites nouveaux – doivent être prises en compte pour que l'on puisse être en mesure de recommander, de façon étayée, leur consommation dans le cadre d'un régime alimentaire. Comme on le fait pour les apports en protéines ou en lipides, pourrait-on aussi recommander des apports en microorganismes et en aliments fermentés ? Ce sont des réflexions qui sont actuel-

### DOMINO

Un projet européen pour étudier l'effet santé des aliments fermentés

20 partenaires européens de 10 pays se sont associés dans le projet Domino, coordonné par l'unité Micalis afin d'étudier l'hypothétique effet santé des aliments fermentés.

Un des axes de recherche du projet consiste à croiser les données des microorganismes des aliments et celles du microbiote intestinal avec celles de physiologie humaine de l'hôte.

L'objectif : identifier des phénomènes biologiques qui puissent démontrer l'effet santé des aliments fermentés.

lement menées aussi bien aux États-Unis qu'en Europe.

### Quels sont les axes de recherche sur ce sujet ?

La question est de savoir ce que ces aliments apportent de différent par rapport à d'autres catégories d'aliments et en quoi ces apports sont bons pour notre santé. Ce sont des axes de recherche qui sont actuellement explorés de manière systématique. Ainsi, le Grand défi Ferments du Futur, financé par l'État dans le cadre de la stratégie d'accélération pour la santé, à hauteur de 48 millions d'euros, trace de grandes lignes d'investigation et de recherche : comprendre comment les microorganismes peuvent transformer toute matrice alimentaire, y compris des aliments encore jamais fermentés, comprendre comment les procédés de fermentation et de fabrication des aliments fermentés conditionnent les capacités de ces microorganismes, et comprendre comment ces microorganismes et les composés qu'ils ont produit interagissent avec notre microbiote intestinal. C'est grâce à la construction de cette vaste connaissance que pourront se développer les innovations les plus performantes pour mieux construire les aliments fermentés qui répondent à nos besoins de santé.

1. [url.inrae.fr/3eHgOMI](http://url.inrae.fr/3eHgOMI)

# UN POTENTIEL AU SERVICE DE LA TRANSITION ALIMENTAIRE

Développer les aliments fermentés est un défi pour la recherche. Il s'agit d'explorer l'immense biodiversité naturelle des microorganismes et de développer des procédés de fermentation nouveaux, permettant d'optimiser les aliments existants ou de créer de nouveaux aliments.

## Tour d'horizon des recherches.

Alors que la fermentation est utilisée depuis des millénaires, pourquoi est-elle aujourd'hui perçue comme une puissante source d'innovations alimentaires? « *Même si la fermentation est une pratique ancestrale, son potentiel est totalement sous-exploité, en termes de microorganismes utilisés, de procédés de fermentation et au final d'aliments et de boissons fermentés* », explique Damien Paineau, directeur exécutif du programme de recherche et d'innovation Grand défi Ferments du Futur (voir encadré page 61). Des microorganismes, il en existe des milliards alors que très peu sont utilisés pour la fermentation alimentaire. « *Pour la production de yaourts, seulement deux souches de bactéries sont utilisées!* », précise Marie-Christine Champomier-Vergès. Un enjeu fort pour la recherche est d'explorer davantage la biodiversité naturelle des microorganismes disponibles et d'identifier si certains ne pourraient pas avoir des intérêts en-

**4 000**  
souches de  
bactéries d'intérêt  
alimentaire sont  
conservées  
à -80 °C par l'INRAE

core inconnus à ce jour. Autre voie de recherche : comprendre les effets d'une fermentation réalisée avec plusieurs microorganismes, des consortia, et identifier quelles seraient les fonctionnalités, nutritionnelles ou sensorielles, que cela confère à l'aliment ou aux boissons fermentées.

### Explorer la biodiversité des bactéries et des levures

C'est l'ambition des CIRM, les centres internationaux de ressources microbiennes, qui sont des lieux pour conserver de manière pérenne, rendre visibles et valoriser des collections de microorganismes. Il en existe cinq en France, gérés par INRAE, dont un entièrement dédié aux bactéries d'intérêt alimentaire, le CIRM BIA, basé à Rennes au sein de l'unité STLO et un autre dédié aux levures à Montpellier au sein de l'unité SPO. « *Nous gardons un véritable trésor, beaucoup de ces bactéries*

ont des fonctionnalités d'intérêt pour la fermentation des aliments», explique Florence Valence, responsable du CIRM BIA.

«Pour la collecte, nous allons chercher les bactéries là où elles sont!» Par exemple dans le cadre d'un projet sur la caractérisation de la diversité microbienne associée à des moûts de raisin issus de différents cépages, les scientifiques ont collecté plus de 600 souches de bactéries pour étudier leur intérêt en termes de biodiversité et de fonctionnalités. Pour les conserver, les 4 000 souches de la collection du CIRM BIA sont soit cryogénisées et stockées à -80 degrés, soit lyophilisées.

Il s'agit également de caractériser les ressources microbiologiques d'un point de vue génotypique et phénotypique, et de trouver des fonctionnalités d'intérêt en lien avec les aliments fermentés. «On s'intéresse à des fonctionnalités telles que la production de composés d'arômes, l'activité probiotique, l'activité texturante, ainsi que la capacité des bactéries à se développer dans certaines conditions d'acidité ou de pH pour répondre à des besoins de procédés alimentaires particuliers», précise Florence Valence.

Enfin, la valorisation se fait par le biais de projets spécifiques de recherche à INRAE mais aussi via la diffusion des souches auprès des communautés scientifiques, académiques et industrielles qui souhaitent les utiliser. «Nous travaillons souvent avec les industriels, car beaucoup de nos souches ont des intérêts agroalimentaires.» Dans le cadre du projet Profil, en collaboration avec des industriels, les chercheurs et chercheuses ont «criblé» 700 souches pour trouver des bactéries avec des propriétés antifongiques. Six ans plus tard, les scientifiques ont transféré sept bactéries identifiées comme antifongiques aux industriels pour leur permettre, par exemple, de les utiliser à la place du sorbate ou de la natamycine, additifs habituels des produits laitiers, et ainsi éviter, avec une méthode naturelle, la formation de moisissures. Mais tout ce travail n'a d'intérêt que si nous conservons bien les données associées à cette collection précise Florence Valence: «c'est une chose de conserver ces échantillons, mais ce qui est clé aujourd'hui c'est la conservation et la gestion des données qui y sont associées. Une ressource sans données associées n'a finalement aucune valeur».

#### L'intelligence artificielle à la rescousse

Jusqu'à présent, en microbiologie, les chercheurs →

#### PROGRAMME

## Accélérer l'innovation pour l'alimentation du futur

Pour répondre aux enjeux d'innovation dans le domaine des ferments et des aliments fermentés, les équipes de recherche et les acteurs économiques se mettent en ordre de marche à travers le Grand défi Ferments du Futur. Initié par le gouvernement et porté par INRAE et l'ANIA [Association nationale des industries alimentaires],

ce programme bénéficie de financements publics très importants dans le cadre de France 2030. Lancé en septembre 2022, il s'appuiera sur des projets sélectionnés dans le cadre d'appels à projets annuels. Une plateforme d'innovation unique en Europe, implantée sur le plateau de Saclay, sera mise en place fin 2023.

#### START-UP

## Plus de végétal

Fermenter des végétaux pour obtenir un produit qui ressemble à du fromage, c'est l'idée de la start-up Les Nouveaux Affineurs. L'idée devient un projet, incubé au Food'Inn Lab d'AgroParisTech début 2017 pour devenir une jeune entreprise qui commercialise ses produits depuis 2018. «Nous avons bénéficié de l'expertise d'INRAE dans le domaine de la microbiologie alimentaire et nous avons monté un partenariat avec l'unité mixte de recherche sur le fromage (UMRF à Aurillac), avec le soutien du Carnot Qualiment, pour améliorer nos produits et faire des expérimentations», explique Nour Akbaraly, fondateur des Nouveaux Affineurs. Aujourd'hui la start-up propose des produits alternatifs aux fromages, à

base de soja ou de noix de cajou, avec une empreinte carbone divisée par cinq par rapport aux fromages classiques. De son côté, grâce à la fermentation, la start-up Green spot transforme les coproduits végétaux, dont les épiluchures de pomme, en farines à haute teneur en protéines, en fibres, riches en vitamines, minéraux et anti-oxydants naturels, sans gluten et faibles en calories. Pour se développer, la start-up Green Spot a été accueillie un an dans les laboratoires de TWB [Toulouse White Biotechnologie] à INRAE, bénéficiant ainsi des équipements de pointe pour la fermentation. La start-up poursuit sa collaboration avec TWB et est d'ailleurs membre de leur consortium.



travaillent avec des approches empiriques : ils testent des microorganismes, les font interagir avec des aliments et analysent les résultats. Avec le numérique, les scientifiques s'orientent vers des approches plus prédictives : « *dans le Grand Défi Ferments du Futur, on va s'appuyer sur la science des données et l'intelligence artificielle pour prédire l'action des microorganismes et ainsi optimiser la phase expérimentale* », explique Damien Paineau. La plateforme d'innovation à Saclay permettra d'expérimenter à plus grande échelle et plus rapidement. Un autre enjeu est de diversifier les procédés pour pouvoir fermenter de nouvelles matrices, en particulier végétales, comme les céréales, les légumineuses et les fruits. « *La plupart des procédés industriels de fermentation concernent des matrices liquides, comme le lait ou le jus de raisin, ou semi-solides telles que la pâte à pain, mais on doit poursuivre les développements technologiques pour être capables de fermenter des matrices plus complexes, comme des gels ou des solides* », souligne Damien Paineau. En effet, ces matrices présentent une hétérogénéité entre le cœur et la périphérie de la matière première, nécessitant d'adapter les itinéraires technologiques.

Enfin, il s'agit pour la recherche de mieux comprendre les liens potentiels entre aliments fermentés et santé, en particulier les interactions entre les microorganismes des aliments et ceux du microbiote de la personne qui ingère ces aliments. ●

**« Il s'agit de conserver un patrimoine. Avec toutes les normes sanitaires on a diminué les risques liés aux bactéries pathogènes mais on a diminué aussi le nombre de bactéries utiles. »**

## ACTION COST PIMENTO

## Un réseau européen au service de l'alimentation fermentée

Pimento (Promoting Innovation of ferMENTed fOods) est un réseau européen pour promouvoir l'innovation en matière d'aliments fermentés. Financé dans le cadre d'une action COST [Coopération européenne en science et technologie], le réseau fédère des communautés scientifiques travaillant sur cette thématique en y associant des non-scientifiques : industriels, journalistes, citoyens développant ainsi une vision multiacteur avec une approche transdisciplinaire. « *Associer la société civile à ce type de projets permet de partager des connaissances mais aussi des bonnes pratiques de sécurité sanitaire avec les citoyens qui fermentent chez eux notamment* », explique Christophe Chassard, directeur de l'unité mixte de recherche sur le fromage et responsable de l'action COST Pimento.

À sa mise en place en 2021, le réseau comptait une soixantaine de membres et aujourd'hui, Pimento c'est plus de 300 personnes : « *C'est un véritable travail collaboratif, on rassemble des scientifiques de différents pays, de différentes disciplines. On arrive à partager nos travaux sur les aliments fermentés et à élargir les communautés* ». Parmi les actions phares, 16 projets sont développés au sein de Pimento pour évaluer scientifiquement les impacts santé des aliments fermentés en termes de bénéfices mais aussi de risques. Deux autres livrables majeurs sont attendus. Le premier est une cartographie européenne des aliments fermentés ; le deuxième est de créer un cluster européen public/privé autour des aliments fermentés pour renforcer la recherche et accélérer l'innovation sur ce secteur et ainsi positionner l'Europe comme acteur majeur d'un sujet hautement stratégique à l'échelle mondiale, perçu comme étant un véritable levier pour l'autonomie et la souveraineté alimentaire.



## GOÛT Fermenter des légumineuses

Les légumineuses, pois, lentilles, soja, ont des atouts au champ comme dans l'assiette. Capables de fixer l'azote du sol, elles ont l'avantage de se passer d'engrais azotés. Sources de protéines, elles sont une bonne alternative aux protéines animales dont les pays occidentaux doivent diminuer la consommation. Seulement, elles n'ont pas toujours bon goût, les consommateurs apprécient peu leur amertume et leurs notes terreuses. Un levier pour développer de meilleures qualités sensorielles des légumineuses : la fermentation ! « À l'unité Sayfood, on a fait le pari que tout ce que l'on connaît de la fermentation du lait, on pourrait l'appliquer au pois, légumineuse la plus

*cultivée en France* », explique Isabelle Souchon, aujourd'hui chercheuse à l'unité Sécurité et qualité des produits d'origine végétale (SQPOV). L'idée est lancée. Les scientifiques ont alors montré qu'il était possible d'utiliser des bactéries lactiques pour fermenter un mélange de lait et de protéines de pois. Sur les 55 souches testées dans 160 associations, 11 associations composées de 5 à 9 souches ont été retenues. Les écosystèmes choisis ont la particularité de masquer le goût « vert » caractéristique du pois et d'apporter différentes textures allant de la crème dessert à une pâte plus ferme. Mais qu'en disent les consommateurs ? Sont-ils prêts à acheter ces nouveaux produits ? Le projet Diet+ a mobilisé une équipe d'économistes pour étudier le consentement à payer en fonction des informations qu'on leur met à disposition. Le résultat est sans appel, même s'il y a un léger effet de consentement à

payer lorsque le consommateur sait que le produit est bon pour la santé ou qu'il a un impact plus faible sur l'environnement, c'est bien le goût qui conditionne leur choix de consommation.

Et si la fermentation permettait d'avoir des aliments moins transformés ? Arômes, stabilisants, conservateurs, les industriels ont parfois recours à des additifs de synthèse et l'on sait que certains pourraient avoir des impacts néfastes sur la santé. Or la fermentation peut agir sur ces trois facteurs. Isabelle Souchon expérimente cela... sur la fraise ! « *La fraise est un produit qui se conserve très mal, qui est très consommé et souvent transformé pour l'ajouter dans les yaourts, les biscuits ou les glaces.* » Un projet est mené en partenariat avec l'Atelier du fruit pour identifier les ferments les plus adaptés et optimiser les procédés de fermentation pour pouvoir les reproduire à l'échelle industrielle.



# Les industriels misent sur les aliments fermentés

Rencontre avec Damien Paineau  
et Antoine Baule

Damien Paineau est directeur exécutif du Grand défi Ferments du Futur piloté par INRAE et l'ANIA, l'Association nationale des industries alimentaires. Antoine Baule est président de la commission innovation de l'ANIA.

**Interview croisée.**

## Pourquoi les industriels s'intéressent-ils aux aliments fermentés ?

**Antoine Baule** La science des microorganismes et la biotechnologie au sens large ont fait des progrès absolument considérables. Les industriels en sont conscients et ils se sont intéressés à ce sujet soit parce qu'ils produisent des microorganismes soit parce qu'ils les utilisent. C'est le cas des grands de l'industrie laitière, de la charcuterie mais aussi du vin et de la bière. Pour

eux, les bénéfiques sont de plusieurs ordres : une meilleure sélection des microorganismes pour faire des aliments fermentés de bonne qualité et de meilleure résistance, et le développement de nouveaux aliments.

**Damien Paineau** Si on parle des industriels, on parle indirectement des consommateurs. On voit bien la tendance actuelle qui est d'aller vers des solutions plus naturelles : des aliments avec une liste d'ingrédients plus courte, des aliments non transformés ou moins transformés, avec moins d'additifs chimiques. On sait que la fermentation va permettre de conserver les aliments en limitant significativement le recours à ces additifs.

**A. B.** On peut prendre l'exemple de la vanilline. Cet arôme de vanille, très utilisé aujourd'hui, provient actuellement de la chimie du carbone et donc du pétrole. La fermentation permettrait d'obtenir de la vanilline, et de nombreux autres arômes, de façon naturelle.

C'est un des gros bénéfices de la fermentation et c'est ce qui attire les industriels. Petit à petit la fermentation évincera les ingrédients obtenus par synthèse organique.

## Quel intérêt pour les industriels de s'impliquer dans ce vaste programme de recherche ?

**A. B.** Dans l'objectif de développer des alternatives aux protéines animales, les industriels veulent développer des nouveaux produits à base de protéines végétales. Or les protéines végétales brutes ne sont pas extraordinaires d'un point de vue organoleptique. En revanche si vous les fermentez, vous obtenez des goûts et des textures très intéressantes. Mais, la structure des matrices végétales étant très hétérogène, on ne sait pas encore très bien les fermenter à grande échelle. Les industriels sont donc très en demande des avancées de la science sur ce sujet.

**D. P.** C'est un bon exemple ! En effet, si un industriel veut développer un aliment



de type fromage mais à base de protéines végétales et qu'il s'aperçoit que ses premiers produits ont des limites telles que la digestibilité des protéines ou des goûts peu satisfaisants, il va s'adresser à la plateforme de Ferments du Futur pour trouver un nouveau mix de microorganismes ou pour développer un processus de transformation qui permet d'augmenter la biodisponibilité des protéines et de retirer les « mauvais » goûts identifiés dans son produit.

Côté recherche, on va regarder dans notre base de données qui recense des milliers de microorganismes pour identifier, via des approches prédictives, des groupes de bactéries qui pourraient apporter les bénéfices attendus par l'industriel. Mais cela suppose d'avoir une base de données riche et très bien caractérisée, et de développer des modèles prédictifs tenant compte des relations extrêmement complexes entre microorganismes. C'est un véritable défi en soi. Dans une deuxième phase, on pourra tester les microorganismes et les procédés de façon expérimentale afin de s'assurer que les bénéfices attendus sont bien effectifs.

#### Et pour la recherche ?

**D. P.** Ce Grand défi est animé par un consortium mixte d'acteurs publics et privés qui collaborent pour lever les verrous scientifiques et technologiques dans les domaines de la fermentation. Il s'agit bien sûr de produire des connaissances, mais aussi de travailler en direct avec les industriels pour s'adapter plus vite aux attentes des consommateurs, et ainsi accélérer l'innovation au service des transitions alimentaires. L'enjeu est de maintenir et de renforcer le leadership français et européen sur une thématique hautement stratégique, qui est soutenue par des investissements publics et privés massifs dans le monde entier.

**A. B.** Les progrès de la science de ces

## « L'enjeu est de maintenir et renforcer le leadership français et européen sur une thématique stratégique. »

vingt dernières années permettent d'avoir aujourd'hui des résultats très concrets pour les industriels. Le premier décryptage du génome d'une levure était encore il y a quelques années le fruit d'un an de travail, aujourd'hui les technologies permettent d'en décrypter trois ou quatre par jour !

#### Quels seront les équipements technologiques qui seront développés dans Ferments du Futur ?

**D. P.** On va commencer par s'appuyer sur les infrastructures existantes dans les équipes de recherche impliquées dans ce Grand défi. Ensuite, on prévoit la mise en place d'une plateforme technologique extrêmement innovante sur le plateau de Saclay (91) fin 2023, avec pour objectif de démarrer des projets en 2024. Cette plateforme qui sera unique en Europe sera composée de trois plateaux techniques : un plateau dédié au criblage haut débit des consortia microbiens afin d'identifier les meilleures combinaisons de microorganismes par rapport à un objectif prédéfini. Un second plateau développera de nouveaux procédés grâce à des fermenteurs permettant de travailler des matrices très diverses, à différentes échelles. Enfin, une plateforme analytique permettra de caractériser finement l'aliment produit sur des aspects sensoriels, nutritionnels ou encore santé. Cette plateforme technologique est au centre du dispositif. Elle a pour objectif de fournir à l'industriel partenaire une preuve de concept robuste qui lui permette de poursuivre le développement dans ses propres infrastructures. Elle a vocation

à être pérennisée pour fonctionner au-delà de la durée du programme.

**A. B.** La plateforme sera le point d'entrée des industriels vers l'ensemble des compétences de recherche d'INRAE et de ses partenaires scientifiques. Et c'est tout l'intérêt d'un tel partenariat public/privé : faire de la recherche amont que les industriels ne peuvent pas financer car ils sont davantage dans des objectifs à court terme. Les connaissances produites pourront être brevetées et trouver des applications auprès des industriels. C'est finalement un moyen formidable d'accélérer l'innovation !

#### Les procédés seront-ils eux aussi durables ?

**D. P.** C'est en tout cas un des objectifs de Ferments du Futur ! Aujourd'hui, les procédés de fermentation utilisés en milieu industriel ne sont pas particulièrement économes en énergie, en eau, en substrats de fermentation et produisent des déchets. Dans le cadre de Ferments du Futur, lorsque l'on va développer des nouveaux procédés, on va évidemment s'attacher à réduire leur impact environnemental pour que non seulement les aliments produits soient au rendez-vous des attentes sociétales mais que la façon de les produire le soit aussi. Par exemple, si on arrive à réduire de quelques degrés les conditions de fermentation tout en maintenant de bons résultats sur les produits, à l'échelle industrielle, il peut y avoir un impact environnemental majeur.

# 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

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

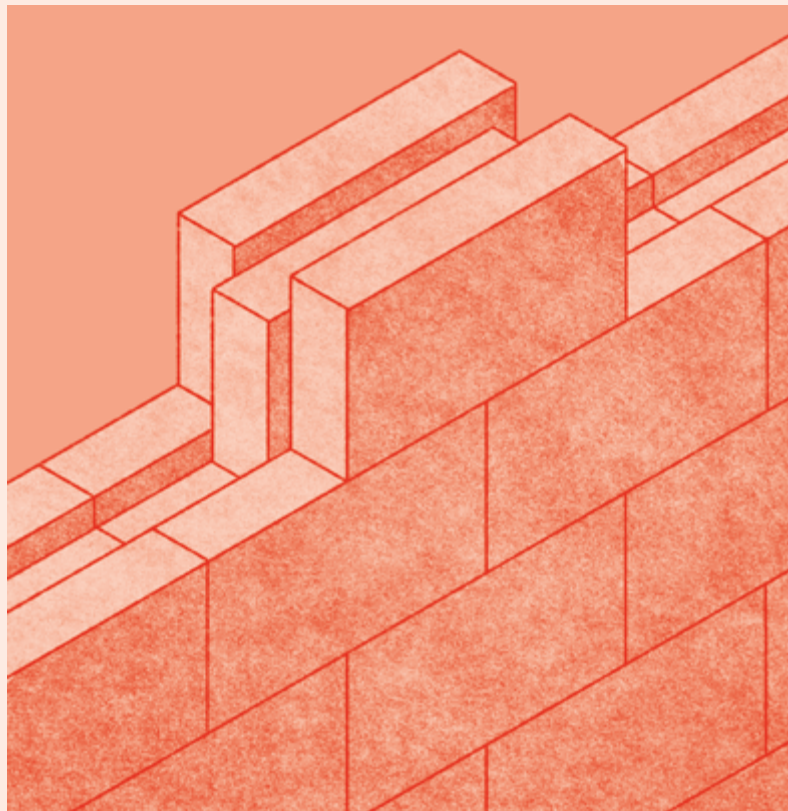


1

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.

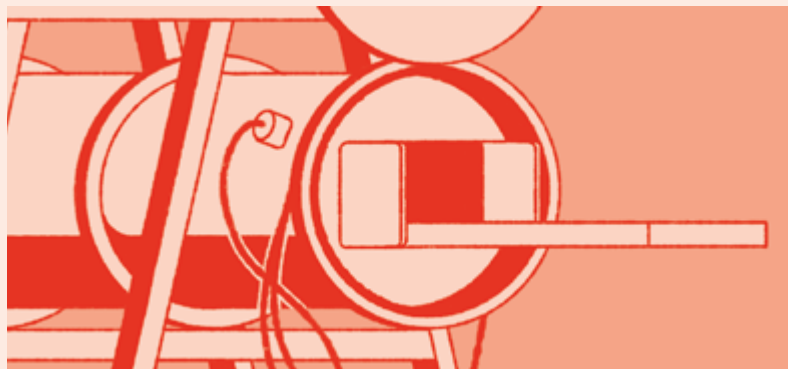
2. Toutes les forêts ne sont pas équivalentes en termes d'absorption du CO<sub>2</sub>. Un nouvel outil permet d'évaluer et suivre leur capacité Biomass Carbon Monitor - [url.inrae.fr/317QVhN](http://url.inrae.fr/317QVhN)

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.



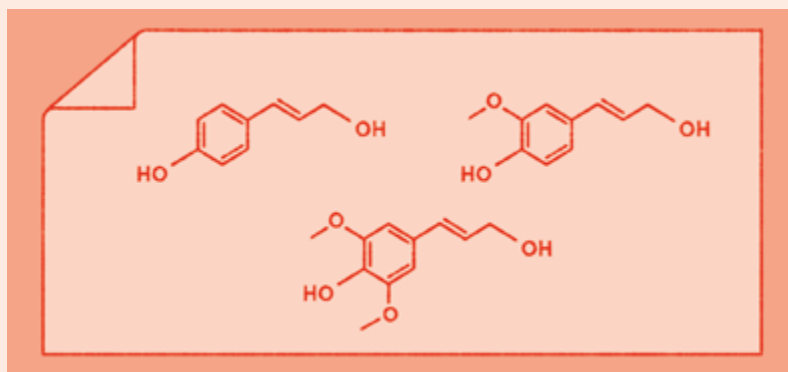
4

## 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

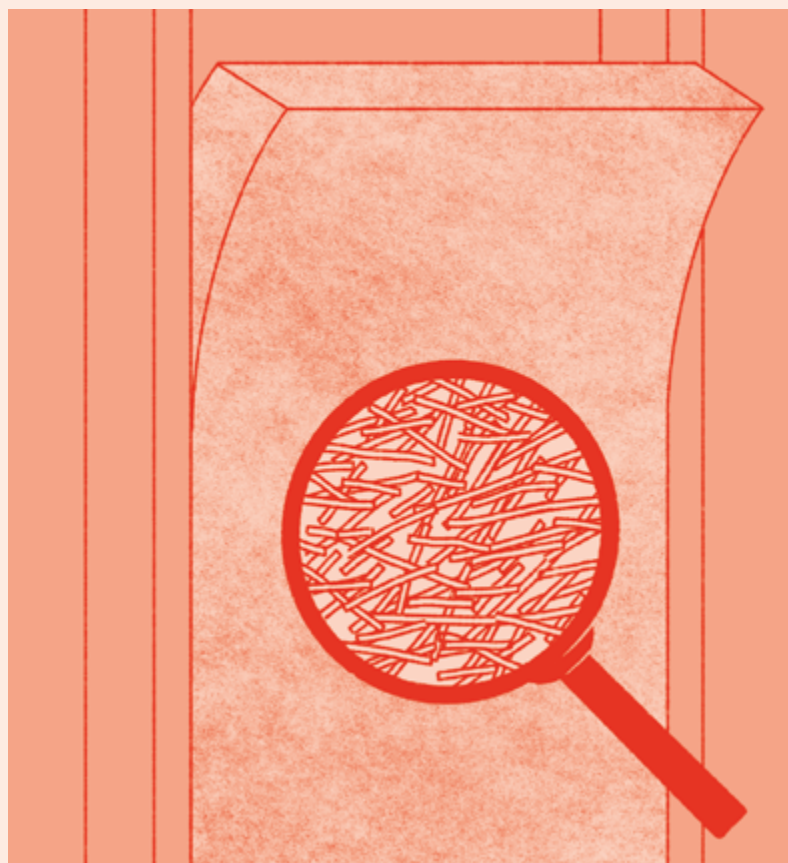
#### ISOLATION

## 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

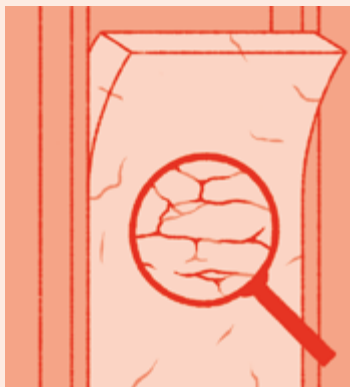
C'est l'angle mort du recyclage. En France, quelque 40 millions de tonnes de déchets non recyclables sont enfouis ou incinérés chaque année. En interrogeant différents experts du Carnot 3BCAR, la start-up Néolithe a trouvé une autre porte de sortie pour ces déchets ultimes : les transformer en pierre. 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, Néolithe 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 →

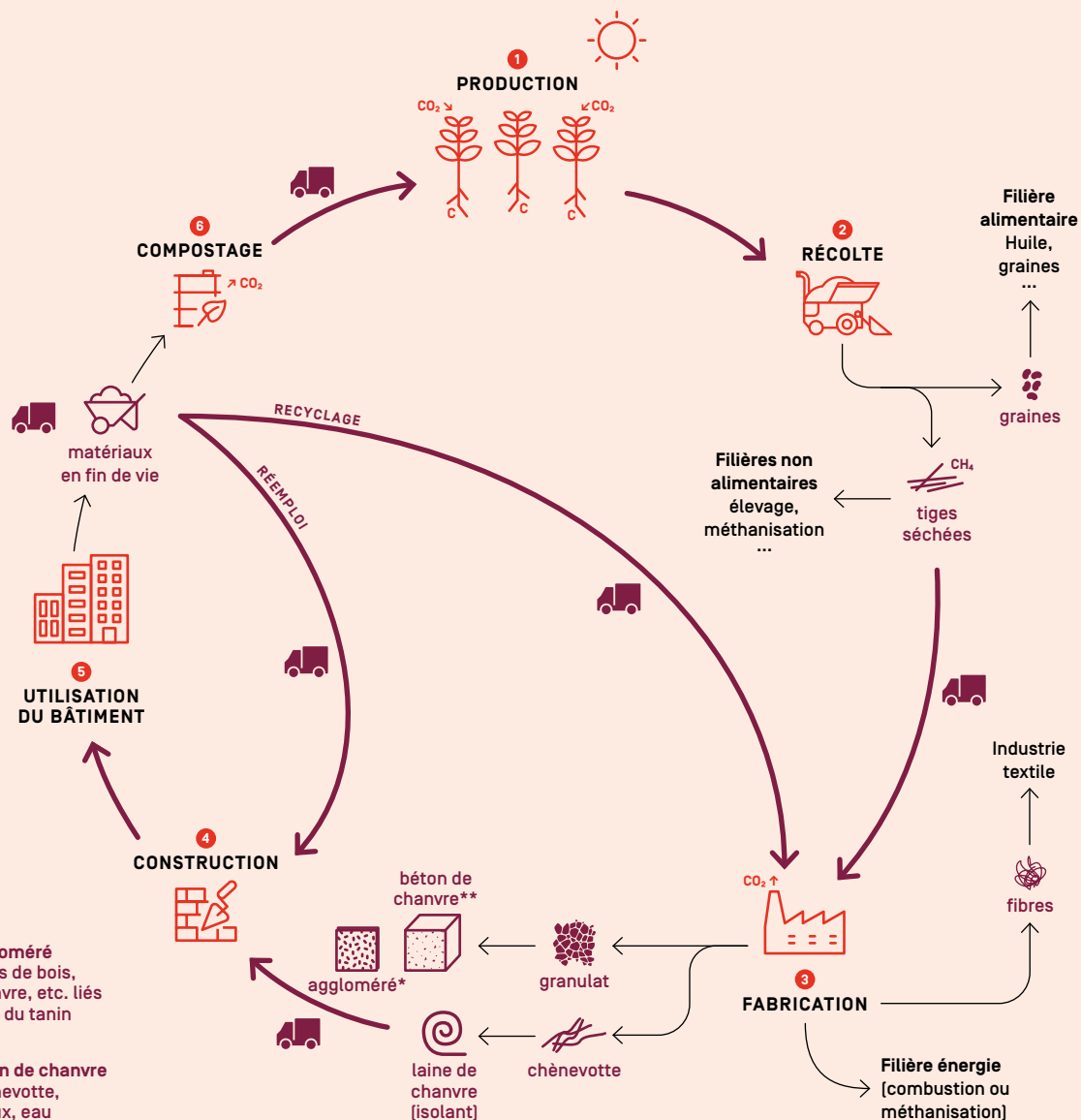
←  
Photo ci-contre  
Croissance et  
séchage de paille  
de lin en serre pour  
évaluer l'impact  
des conditions  
météorologiques  
sur la qualité des  
fibres.

**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



\* aggloméré fibres de bois, chanvre, etc. liés avec du tannin

\*\* béton de chanvre chènevotte, chaux, eau

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. »

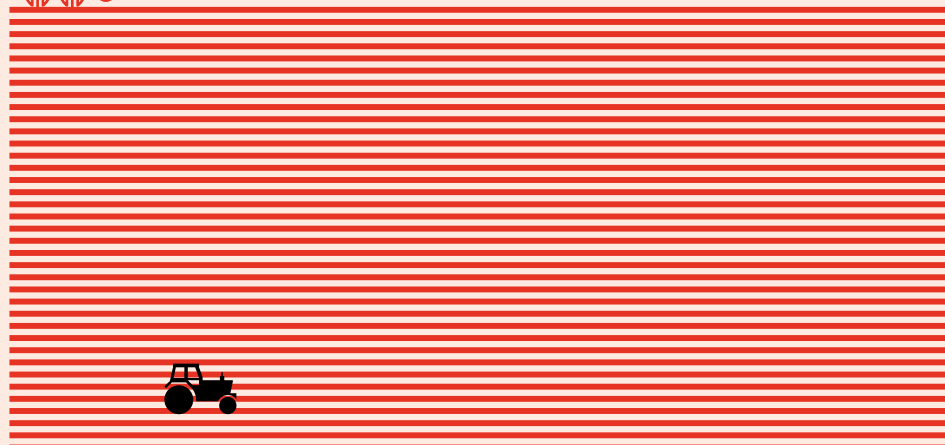
### Des estimations en majorité modélisées mathématiquement

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.

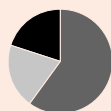
\*\*fèverre, féverole, pois, lupin doux

## 4 CULTURES DÉDIÉES

### MISCANTHUS 6 400 ha

= 58 tMS/an

produits et récoltables dont :

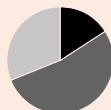


- 60 % utilisés comme combustible  
(four à déshydratation, chaudière)
- 20 % utilisés pour  
la litière d'élevage
- 20 % utilisés pour  
le paillage horticoles

### FIBRE DE LIN 118 900 ha

= 808 tMS/an

produites et récoltables dont :

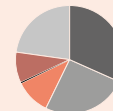


- 53 % à destination de  
la filière des matériaux
- 16 % à destination de la filière  
énergie par combustion
- 31 % à destination de  
la filière textile

### 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 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>. ●



## REPLAY

Une sélection d'informations  
qui ont fait l'actualité INRAE  
des mois passés.

05.09.22

ENSEIGNEMENT

# C'EST PARTI POUR LE CAMPUS AGRO PARIS-SACLAY

À la rentrée, 2 500 étudiants, 1 350 enseignants-chercheurs, chercheurs, techniciens et personnels d'AgroParisTech et d'INRAE intègrent progressivement le site de 66 000 m<sup>2</sup> dédié à la formation, la recherche et

l'innovation. Ce campus Agro, installé au cœur de l'écosystème de l'université Paris-Saclay, renforce la visibilité internationale de ce pôle d'excellence pour les sciences et les industries du vivant et de l'environnement.



© Campus Agro Paris-Saclay (CASAS)

20.06.22

CLIMAT



© INRAE - Alexis Ducoussou

### Aider les chênes à s'adapter

L'ONF et INRAE publient, dans *Annals of Forest Science*, les résultats de 30 ans d'études sur quatre plantations départementales de chênes sessiles en France. De manière surprenante, les chênes présentant le meilleur compromis entre survie, croissance, adaptation aux variations climatiques et forme de l'arbre provenaient de régions ayant connu une longue tradition de sylviculture. Les scientifiques rappellent toutefois l'importance de mélanger les sources de graines afin de maintenir la diversité génétique des plantations, essentielle pour l'adaptation au changement climatique.

01.06.22

PRIX



### Alimentation « ex vivo » : Clinic'n'Cell récompensé

Émanant des laboratoires d'INRAE et de l'université de Clermont-Ferrand, la start-up Clinic'n'Cell reçoit le prix Start-up des NutraIngredients Awards qui récompense les acteurs internationaux du secteur de la nutrition et des compléments alimentaires. Clinic'n'Cell développe une approche clinique dite ex vivo pour évaluer les effets des compléments et des nutriments sur la santé humaine sans passer par l'expérimentation animale.

06.07.22

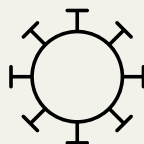
COOPÉRATION

## Un accord franco-canadien pour le bois et la forêt

Sept acteurs académiques franco-canadiens, dont INRAE, se sont associés pour constituer le Réseau de recherche à l'international (2RI) FORest, Wood, market and society (FORWARD). Face aux défis posés à la filière bois, domaine stratégique de part et d'autre de l'Atlantique, les partenaires s'engagent à accroître leurs collaborations en recherche, formation et transfert de connaissances. Leur ambition est d'améliorer les réponses en termes d'adaptation aux événements climatiques et invasions biologiques, d'atténuation face au changement global et d'acceptation pour construire un nouveau rapport social et politique au bois et à la forêt.

13.09.22

SANTÉ



## DES PROTÉINES POUR STOPPER LE COVID

Les scientifiques d'INRAE, en collaboration avec l'EnvA et l'université Paris-Saclay publient dans la revue *PLOS Pathogens* leurs résultats prometteurs pour limiter la propagation du virus SARS-CoV-2. En effet, ils ont réussi à sélectionner et utiliser des protéines qui empêchent la fixation du virus dans la cavité nasale et limitent sa multiplication.

MAI - OCT. 22

ENVIRONNEMENT



© INRAE

## VERS UNE AGRICULTURE SANS PESTICIDES

L'Ifremer et INRAE présentent les conclusions de deux expertises scientifiques collectives. Le premier porte sur les impacts des produits phytopharmaceutiques sur la biodiversité et les services écosystémiques, depuis leurs zones d'épandage jusqu'au milieu marin, en France métropolitaine et en outre-mer.

Elle confirme la contamination de l'ensemble des milieux (écosystèmes et populations) terrestres, aquatiques et marins – notamment côtiers –, même si elle tend à diminuer pour les substances interdites depuis plusieurs années. La seconde démontre l'efficacité des pratiques de diversification végétale pour protéger les cultures des ravageurs, à l'échelle de la parcelle au paysage, à partir de 2000 références scientifiques internationales.

En juin, 400 chercheurs européens étaient réunis par INRAE à Dijon autour de la question de la transition vers une agriculture sans pesticides. Organisées dans le cadre de la présidence française de l'Union européenne, ces deux journées ont permis de fructueux échanges autour des innovations de rupture à inventer et celles déjà déployées en Europe.

Ces échanges ont été complétés d'une visite du site expérimental agroécologique 0-pesticide du domaine d'Époisses, CA-SYS.

27.06.22

RECHERCHE

## HARO SUR LES MICRO-PLASTIQUES !

Les microplastiques favorisent les agrégats de microalgues qui constituent en grande partie le plancton, premier élément de la chaîne alimentaire aquatique qui remonte aux plus gros poissons et à l'être humain. Des scientifiques de trois laboratoires implantés à Toulouse, dont Toulouse Biotechnology Institute,

ont confirmé dans des travaux publiés dans la revue *Science of the Total Environment* les mécanismes en place à l'aide d'un microscope à force atomique. Les chercheurs poursuivent leurs travaux et étudient les conséquences de l'ingestion de ces micro- ou nanoplastiques sur la santé des animaux et des Hommes.

08 . 07 . 22

RECHERCHE

## UNE PLATEFORME NATIONALE POUR LA QUALITÉ DES DONNÉES

Le ministère de l'Enseignement supérieur et de la Recherche annonce l'ouverture de la plateforme recherche.data.gouv.fr. Face aux enjeux stratégiques des données, cette plateforme propose un entrepôt pluridisciplinaire de stockage et partage de jeux de données validés aux chercheurs qui n'auraient pas de solution propre de dépôt de confiance. INRAE, reconnu pour son expertise dans ce domaine, a développé la partie technique de l'entrepôt ainsi que le catalogue associé.

12 . 09 . 22

INNOVATION



© INRAE

### Une mobilisation publique/privée pour les Ferments du Futurs

INRAE lance avec l'ANIA son premier Grand défi, Ferments du Futur, en présence des ministres en charge de la Recherche, Sylvie Retailleau, de l'Agriculture, Marc Fesneau, et du secrétaire général pour l'Investissement, Bruno Bonnell. Doté par l'État, dans le cadre de France 2030, à hauteur de 48,3 millions d'euros, ce programme vise à accélérer la recherche et le développement dans le secteur prometteur de la fermentation pour une transition vers une alimentation saine et durable. Une plateforme d'innovation est notamment attendue fin 2023 sur le plateau de Saclay. Une vingtaine de partenaires privés ont rejoint les équipes de recherche publique des universités Clermont-Auvergne, Paris-Saclay, d'AgroParisTech, Vetagro Sup, l'Institut Agro et d'INRAE dans ce projet exceptionnel.

27 . 09 . 22

START - UP



© INRAE - Christophe Maître

## SOUTENIR L'INNOVATION

Les start-up représentent un levier fort d'innovation et de transformation des résultats de recherche en solutions qui répondent à un besoin du marché. Engagé dans l'accompagnement de ses chercheurs vers des démarches entrepreneuriales, INRAE a lancé le premier appel à idées START And GROw lors de son événement Start-up for planet. Ce nouveau dispositif, porté avec AgroParisTech et l'institut Agro et à destination

des chercheurs, ingénieurs, doctorants et post-doc des trois instituts, vise à détecter précocement les projets d'entreprises afin de les accompagner dans leur développement.

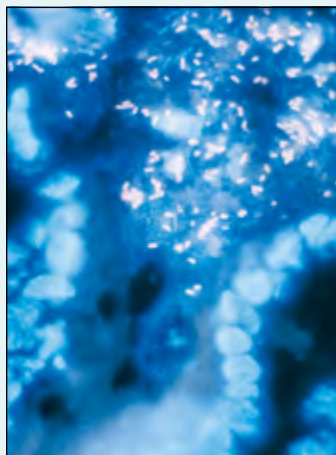
Objectif: accompagner la création de 100 nouvelles start-up dans les domaines de l'agriculture, l'alimentation, l'environnement et l'énergie d'ici à 2026.

Rendez-vous en décembre pour connaître la première promotion de ces futurs entrepreneurs!



15.09.22

MICROBIOTE



©INRAE - Violaine Rochet

## EXPLORATION GÉANTE

Objet de recherche depuis des décennies à INRAE, le microbiote intestinal est désormais reconnu comme un élément déterminant de la santé de ses hôtes, en particulier pour les maladies cardiovasculaires, dégénératives et les troubles neurodéveloppementaux. Ce monde de millions de microorganismes reste cependant encore mystérieux sur son fonctionnement et ses pouvoirs. C'est pourquoi, INRAE (MétaGénoPolis), en collaboration avec l'AP-HP, porte le grand projet de recherche participative Le French Gut.

Ce projet, en lien avec l'initiative internationale Million Microbiome of Humans et inédit en France, vise à recueillir 100 000 échantillons de selles afin de cartographier le microbiote français pour définir les caractéristiques d'un microbiote sain en fonction notamment de l'alimentation et du mode de vie de son hôte. Le projet permettra également d'observer, de décrire le microbiote en présence de maladies et de modéliser son évolution en lien avec celles-ci. L'objectif étant de développer une nutrition préventive personnalisée et également des thérapies à partir de l'alimentation des patients.

Lancé en septembre 2022, le projet a rencontré un vif succès avec plus de 15 000 inscrits en un mois. Rendez-vous en 2027 pour les résultats.

20.09.22

Évaluation Inrae



## SATISFECIT DU HCERES

Le HCERES a salué dans son évaluation les grandes options prises par le nouvel institut INRAE. Réalisée tous les cinq ans, l'évaluation de l'établissement a été menée par un jury international présidé par Sophie d'Amours, rectrice de l'université canadienne de Laval. Ce jury a souligné la qualité du travail d'accompagnement et de conduite du changement lors de la création de l'institut en 2020 et la

prise en compte des recommandations des évaluations précédentes des deux instituts, Inra et Irstea. L'excellence scientifique, l'engagement pour la science ouverte, l'innovation, la responsabilité sociale et environnementale, l'insertion dans le paysage universitaire et la dynamique de sa politique de site ont également fait l'objet de félicitations et d'encouragements.

18.09.22

PARTENARIAT



©FAO

**Pour transformer les systèmes agricoles et alimentaires avec la FAO** INRAE, avec le Cirad et l'IRD, signe un protocole d'accord (2022-2027) de coopération avec la FAO, concrétisant l'engagement des trois instituts de développer les partenariats internationaux pour la transformation des systèmes agricoles et alimentaires. Les enjeux concernés sont ceux du changement climatique, de la biodiversité, de la gestion durable des ressources naturelles et de la transformation des systèmes agricoles et alimentaires.

AGENDA

**25 février - 5 mars 2023**  
[Paris]

Salon international de l'Agriculture

**6 - 8 mars 2023**

[Tunis, Tunisie]

4<sup>es</sup> rencontres internationales

« Lait, vecteur de développement »

**13 - 15 mars 2023**

[Dublin, Irlande]

3<sup>rd</sup> Global Soil Biodiversity  
Conference [GSOBI]

**21 mars 2023 [Europe]**

Restitution de l'étude prospective  
INRAE « Pour une agriculture sans  
pesticides en 2050 »

[www.inrae.fr/evenements](http://www.inrae.fr/evenements)

## ET AUSSI

### Les agricultures urbaines

Comprendre les dynamiques, accompagner les acteurs

Coordination éditoriale :  
Christine Aubry, Giulia Giacchè, Françoise Maxime et Christophe-Toussaint Soulard  
Éditions Quæ, 29,50 €  
(e-book 19,99 €)  
[url.inrae.fr/3g5braH](http://url.inrae.fr/3g5braH)

Destiné aux étudiants, chercheurs et professionnels de l'aménagement urbain, du développement agricole et des politiques alimentaires, cet ouvrage dresse un état des lieux des formations existantes en agriculture urbaine, tout en soulignant les défis à relever et les conditions nécessaires pour développer ces agricultures.

### La revue *Sesame* N°12 – Nov. 2022

[revue-sesame-inrae.fr](http://revue-sesame-inrae.fr)

- Les territoires d'outre-mer
- L'éolien marin
- La précarité alimentaire
- Les politiques publiques et la transition agro-écologique.

*Sesame*, la revue de la mission Agrobiosciences d'INRAE pour le débat d'idées.



### Science et émotion Le rôle de l'émotion dans la pratique de la recherche

Emmanuel Petit (CNRS)  
Éditions Quæ, 9,50 €  
(e-book gratuit)  
[url.inrae.fr/3tw5iHH](http://url.inrae.fr/3tw5iHH)

Motivés par le plaisir intellectuel, la curiosité, animés parfois par la rivalité, l'envie, peu de chercheurs reconnaissent que leurs émotions ont une incidence sur leur façon d'aborder leur objet de recherche, ni sur la manière dont ils la pratiquent. En science, les émotions sont mal vues car on pense qu'elles touchent à l'objectivité. Emmanuel Petit montre qu'il n'en est rien et qu'au contraire, celle-ci est un mode d'accès irremplaçable à la connaissance. Ouvrage issu de la conférence du 2 décembre 2021 dans le cycle INRAE Science en questions.

### Terrix City

Un livre interactif pour les enfants sur l'alimentation

Agnès Fargue-Lelièvre (APT), Claire Painchaud (École Estienne), Véronique Saint-Ges (INRAE), Margaux Vidotto (CNRS)  
[url.inrae.fr/3KLskkH](http://url.inrae.fr/3KLskkH)

Devenez un éco-héros de Terrix City, la ville écologique et durable ! Quiz, vrai/faux, définitions, cet ouvrage est un outil pédagogique permettant de comprendre et faire comprendre les enjeux des systèmes alimentaires durables en ville aux 6-12 ans.



### Roots of tomorrow

Un jeu vidéo pour découvrir l'agroécologie !  
Un jeu produit par la société Gamabilis sous la supervision scientifique d'INRAE et avec les acteurs du monde agricole et des régions.  
[youtu.be/vFhNg2QiOAI](https://youtu.be/vFhNg2QiOAI)

Un jeu vidéo pour découvrir le monde agricole et sa transition vers l'agroécologie ? Voilà Roots of Tomorrow. Construit avec les filières agricoles et les acteurs des territoires, le jeu propose au joueur de développer sa stratégie pour faire évoluer en 10 ans son exploitation vers une gestion multiperformante qui associe économie, environnement et social. Quatre scénarios en polyculture élevage sont déjà proposés. D'autres sont en préparation.

→ [À télécharger sur STEAM](#)

## POUR ALLER + LOIN

## Que peuvent les scientifiques face à un climat toujours plus contrasté ?

Défis climatiques [podcast]  
[bit.ly/3txTMM8](http://bit.ly/3txTMM8)

Dans ce podcast, l'hydrologue Vazken Andréassian, directeur de l'unité de recherche HYCAR, revient sur les phénomènes exceptionnels récents [sécheresse été 2022 en France, inondations terribles au Pakistan], dans une météo se révélant de plus en plus binaire. Il montre comment les travaux de modélisation et les prévisions scientifiques permettent de mieux appréhender ces situations dans l'espoir de nous adapter à ces changements souvent dramatiques.

Ce podcast est le troisième de la série « Défis climatiques : ces initiatives qui font bouger les lignes » proposée par *The Conversation* et réalisée en partenariat avec l'Institut des hautes études pour la science et la technologie (IHST).

## Le microbiote intestinal, des bactéries à la santé

La boucle est bouclée [podcast]

[www.inrae.fr/podcasts-inrae](http://www.inrae.fr/podcasts-inrae)

Que contient notre microbiote intestinal ? Comment l'analyser et définir celui d'un individu sain ? Plus lourd qu'un cerveau humain (environ 2 kg), le microbiote intestinal et ses milliards de bactéries sont influencés par notre alimentation et notre mode de vie. Sébastien Fromentin présente dans cet épisode ses travaux sur le lien entre microbiote intestinal et maladies cardiovasculaires. Il nous présente aussi le projet Le French Gut, qui recueille les échantillons de selles de 100 000 individus pour cartographier le microbiote français !



### SOCIÉTÉ

## Penser le numérique pour une agriculture durable

### Revue

*Annales des Mines :*  
 panorama de l'agriculture numérique et ses impacts dans le monde agricole  
<http://bit.ly/3hNuyq8>

### Webdoc

17 exemples de recherche pour un numérique responsable au service de l'agroécologie.  
[numerique.webdoc.inrae.fr/fev-2022/#page=5](http://numerique.webdoc.inrae.fr/fev-2022/#page=5)

### DÉCRYPTAGE

## Le potentiel insoupçonné des aliments fermentés

### Livre

Flores protectrices pour la conservation des aliments  
 Édition Quæ, 29 €  
 (e-book 19,99 €)  
[www.inrae.fr/3UFMpOD](http://www.inrae.fr/3UFMpOD)

### Blog

Ni cru ni cuit  
 Le blog des aliments fermentés  
[bit.ly/3TwZ9Wo](http://bit.ly/3TwZ9Wo)

Recherche participative  
 Flegme, un projet d'exploration sur la fermentation des végétaux  
[url.inrae.fr/3FPIfew](http://url.inrae.fr/3FPIfew)

### FUTURS

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

### Replay TV

Déchets alimentaires et résidus agricoles, sources d'innovations durables  
[url.inrae.fr/3UG9Vef](http://url.inrae.fr/3UG9Vef)

Conférence de presse  
 Des innovations biosourcées au service d'une bioéconomie circulaire  
[url.inrae.fr/3f2DgzL](http://url.inrae.fr/3f2DgzL)

### Podcast

Construire bas carbone : matériaux biosourcés ou traditionnels ?  
[url.inrae.fr/3TFhPmO](http://url.inrae.fr/3TFhPmO)

### WWW...

Pour aller plus loin  
 → [www.inrae.fr](http://www.inrae.fr)



## LE DICTON DE SAISON

# Mets du fumier dans ton pré en abondance, avant d'y jeter la semence

Et si un vieux dicton agricole, dont on trouve la trace dans un ouvrage de 1872, apportait des éléments de réponse aux problématiques contemporaines environnementales? Sabine Houot, directrice de recherche à INRAE et travaillant sur l'intérêt des matières fertilisantes d'origine résiduaire, nous éclaire.

*« La santé des sols a un rôle majeur pour produire une alimentation saine en quantité, lutter contre le changement climatique et faire face aux enjeux de biodiversité. C'est pourquoi elle est au cœur des recherches agronomiques actuelles. Prendre soin de la terre, c'est ce que nous rappelle ce dicton. »*

## Contribuer à la structuration et à la fertilité des sols

Si on parle souvent des engrais pour nourrir les plantes et améliorer les rendements, il s'agit ici « d'enrichir la terre, véritable garde-manger de notre planète ». Le fumier, produit de la décomposition des déjections des animaux d'élevage et de leur litière (en général de la paille), est connu depuis toujours pour ses vertus agricoles. Son épandage contribue à régénérer les stocks de matières organiques, indispensables pour la biodiversité souterraine, et contributrices de la structure, de l'équilibre physicochimique et de la santé des sols. Dégradé avec le temps, le fumier libère pro-

gressivement les nutriments (azote, phosphore, potassium notamment) nécessaires aux plantes. Mais attention à ne pas tomber dans « l'abondance »; l'usage non maîtrisé d'engrais ou de lisier, en complément du fumier, peut aboutir à un excès d'azote minéral (nitrates) qui appauvrit alors le sol et peut contaminer les nappes phréatiques. Produits du recyclage de nos déchets verts ou de nos déchets organiques ménagers, les composts peuvent également amender les sols. Bien que leurs quantités soient moindres que celles du fumier, ils participent ainsi à rendre à la terre les nutriments prélevés pour nous nourrir; une pratique vertueuse qui sera obligatoire pour tous les particuliers à partir de 2024.

## Atténuer les évolutions climatiques

Si la qualité des sols est cruciale pour l'agriculture, elle l'est aussi d'un point de vue environnemental. Le carbone, présent dans la matière organique, se trouve alors séquestré dans le sol et contribue à compenser les excès d'émission de gaz à effet de serre (dioxyde de carbone, protoxyde d'azote et méthane notamment) liés aux usages des énergies fossiles, mais aussi à l'activité humaine, dont agricole, et responsables des dérèglements climatiques. En enrichissant les sols, on entre dans un cercle vertueux; le sol, plus riche, favorisera la croissance augmentée des plantes qui séquestreront encore davantage de carbone dans les sols. On perçoit alors tout l'intérêt du recyclage des déchets appliqué par nos aïeux: enrichir les sols, garantir une alimentation saine, réduire l'érosion des sols, préserver la biodiversité et atténuer les émissions des gaz à effet de serre. ●

### EN FRANCE

**150 Mt**  
de matières organiques sont épandues sur les sols français tous les ans dont 70 % sont de fumiers

**150 Mt**  
de déjections sont produites directement par les vaches dans les prés

**25 %**  
des apports de fertilisants azotés sont assurés par ces matières organiques







**Les technologies numériques ont ouvert un champ d'applications immense dans tous les domaines d'activité, y compris l'agriculture et l'alimentation. Alors que leur développement s'accélère, les acteurs du secteur sont appelés à choisir les futurs désirés et agir pour faciliter leur mise en place. INRAE présente sa vision d'un numérique levier des agricultures durables.**

