



# RESSOURCES

La revue d'INRAE #2

avril 2022

Décryptage


**Le microbiote  
intestinal, notre  
nouvel allié santé**

Société

**L'agriculture  
va-t-elle  
manquer d'eau ?**

Futurs

**Quelles gestions  
des forêts  
pour demain ?**



← [en couverture]  
Écoulement,  
les Gorges de la Loue  
**Photo proposée par un  
ingénieur d'étude de l'unité  
Riverly au concours photo  
interne INRAE sur l'eau,**  
Centre Lyon-Grenoble –  
Auvergne-Rhône-Alpes



↑

Une banque de terres  
**Inauguré en 2013 à Ardon, le conservatoire européen des échantillons de sols (CEES) abrite 30 000 prélèvements de terre représentatifs de la variété de sols urbains, agricoles, forestiers, etc. Ces 65 tonnes de terre contribuent à la surveillance de leur qualité par l'unité Infosol.** Centre Val de Loire.



↑

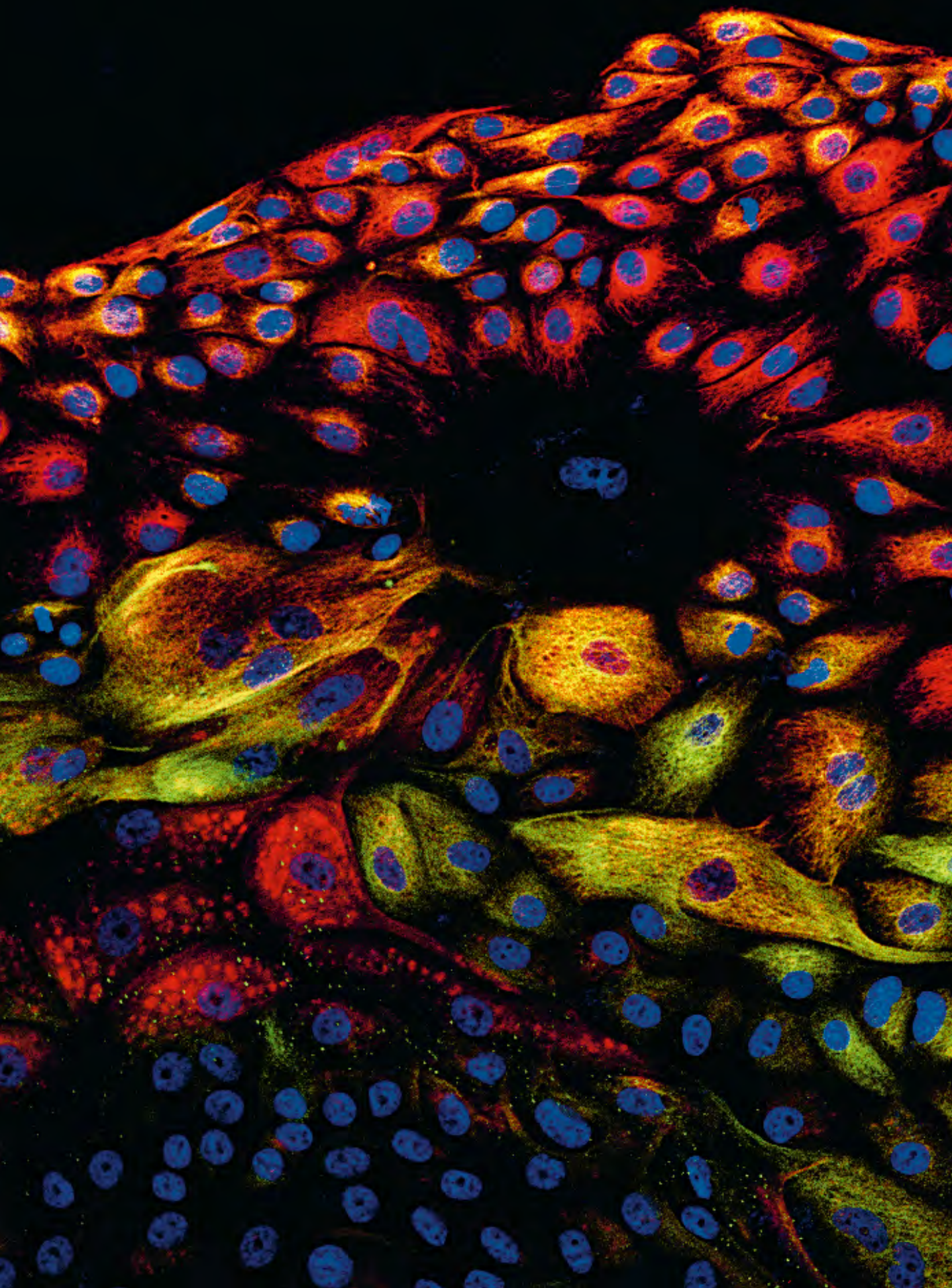
L'étude des goûts  
**Distribution d'échantillons pendant une séance d'analyse gustative par un panel de volontaires au Centre des sciences du goût et de l'alimentation (CSGA) de Dijon.** Centre Bourgogne – Franche-Comté

© INRAE - Bertrand Nicolas

↗

Des cellules en couleur  
**Tanocytes ovins en culture.** Ces cellules sont impliquées dans la plasticité cérébrale et dans le renouvellement de cellules nerveuses chez l'adulte. Unité Physiologie de la reproduction et des Comportements, Centre Val de Loire

© INRAE - Martine Batailler





↑  
Événement extrême  
Le 2 novembre 2014, 150 mm de pluie s'abattent en 24h sur le piémont viticole languedocien, dont le tiers la dernière heure

[Observatoire méditerranéen de l'environnement rural et de l'eau à Roujan]. Cet événement pluvieux responsable d'un ruissellement important et de l'érosion des sols

est étudié pour modéliser les interactions entre ressources en eau et activités agricoles à l'échelle d'un bassin versant. Laboratoire d'étude des

Interactions Sol - Agrosystème - Hydrosystème, Centre Occitanie - Montpellier

© Olivier Huttel - Photothèque UMR LISAH





↑  
Échanges en plein champ  
Lancé en 2012, le réseau RésOPest  
teste en France des systèmes  
de culture sans pesticides dans  
le cadre du plan Écophyto.

Par exemple, le domaine  
expérimental INRAE  
d'Estrées-Mons évalue  
comment favoriser la  
biodiversité régulatrice

d'insectes ravageurs par l'ajout  
de bandes enherbées ou fleuries  
de 3 m de large autour des  
parcelles agricoles : ici, des  
pommes de terre en butte.

Unité expérimentale Grandes  
Cultures Innovation Environnement,  
Centre Hauts-de-France

© INRAE - Aline Waquet





↑  
Une mauvaise herbe modèle  
L'arabette des dames (*Arabidopsis  
thaliana*) qui pousse sur nos  
bords de routes est un organisme  
de référence pour la recherche,  
aussi bien biologique que  
génétique. À l'Institut  
Jean-Pierre Bourdin, l'étude de  
ses mutations non viables a  
permis de mieux comprendre

les mécanismes de défense des  
plantes. Centre Île-de-France -  
Versailles-Grignon

© INRAE - Bertrand Nicolas



→ [page suivante]

**Des cultures et des arbres  
Sur cette parcelle expérimentale  
en agroforesterie au domaine de  
Restinclières, près de Montpellier,  
on teste l'installation de noyers**

**hybrides au sein d'une culture  
de céréale (ici l'orge).**  
Centre Occitanie-Montpellier

@ INRAE - Bertrand Nicolas



**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**  
Avril 2022  
tirage 4 500 ex.  
ISSN 2804-7559

**Directeur de  
publication**  
Philippe Mauguin,  
PDG d'INRAE

**Direction éditoriale**  
Comité éditorial  
*Ressources*

**Rédactrice en chef**  
Aliette Maillard

**Secrétariat de  
rédaction et design  
graphique**  
Atelier Marge Design

**Illustrations**  
Jeremy Perrodeau  
*p. 48-49*

Lou Rihn  
*p. 15, 18; 20-21, 25,  
33, 37, 40*

**Replay**  
La rédaction

**Dicton**  
Maylis Gaillard

**Dossier**  
*Société*  
Pilotes scientifiques:  
Thierry Caquet, Chantal  
Gascuel, Christian  
Huyghe

Conception-  
rédaction:  
Pascale Mollier et  
Sophie Nicaud

Contributeurs:  
Éric Sauquet,  
Christophe Soulard,  
Philippe Hinsinger,  
Mohammed Naaim,  
Jérôme Molenat,  
Patrick Bertuzzi

**Dossier**  
*Décryptage*  
Pilotes scientifiques:  
Monique Axelos, Lionel  
Brétilon, Marie-Christine  
Champomier-Ver-  
gès, Sylvie Dequin,  
Joël Doré

Conception-  
rédaction:  
Élodie Regnier

Constitutrice:  
Anne-Sophie Alvarez

**Dossier**  
*Futurs*  
Pilotes scientifiques:  
Catherine Bastien,  
Thierry Caquet

Conception-  
rédaction:  
Sarah-Louise Filleux  
et Catherine  
Foucaud-Scheunemann

Contributeurs:  
Damien Bonal,  
Thomas Cordonnier,  
Christophe Plomion,  
Bruno Fady, Meriem  
Fournier, Erwin Dreyer,  
Jean-Pierre Wigneron,  
Sylvain Delzon, Clément  
Stahl, Arnaud Sergent,  
Hervé Cochard, Oliver  
Brendel, Cyrille  
Rathgeber, Catherine  
Massonnet, Natathie  
Korboulewsky,  
Et Nicolas Bilot.

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

**PORTFOLIO**  
La recherche en images  
*P. 1*

**ÉDITO**  
*par la rédaction*  
*P. 13*

**SOCIÉTÉ**  
**L'AGRICULTURE  
VA-T-ELLE  
MANQUER D'EAU ?**  
*P. 14*

Une ressource limitée  
à préserver  
*P. 16*

Le partage de l'eau  
dans les territoires  
*P. 22*

L'agroécologie,  
source de solutions  
*P. 29*

Irriguer différemment  
*P. 35*

Aider les agriculteurs  
à s'adapter  
*P. 39*

**ENTRETIEN**  
**Laurent Dirat,  
agriculteur**  
*P. 44*

**DÉCRYPTAGE**  
**LE MICROBIOTE  
INTESTINAL,  
NOTRE NOUVEL  
ALLIÉ SANTÉ**  
*P. 46*

Retour vers le futur  
*P. 50*

**ENTRETIEN**  
**Alexandre Cavezza,  
directeur exécutif de  
MétaGénoPolis**  
*P. 61*

Prendre soin de sa symbiose  
*P. 63*

**FUTURS**  
**QUELLES GESTIONS  
DES FORÊTS  
POUR DEMAIN ?**  
*P. 66*

Un monde de forêts  
*P. 69*

Nos forêts mises à l'épreuve  
*P. 75*

Adaptation,  
des pistes d'action  
*P. 81*

Quelles politiques publiques  
pour des forêts privées ?  
*P. 86*

**REPLAY**  
*P. 90*

**À LIRE**  
*P. 94*

**LE DICTON  
DE SAISON**  
*P. 96*



# Changer notre rapport à la nature

Le changement climatique et global bouleverse notre accès aux ressources naturelles et nous invite à changer notre rapport à celles-ci. Alors que la consommation mondiale d'eau, ressource limitée, ne cesse d'augmenter, il s'agit bien aujourd'hui d'apprendre à l'utiliser différemment et à l'économiser. Afin de nous aider à appréhender cette question majeure, nous avons demandé aux scientifiques d'expliquer dans le dossier *Société* les grands équilibres quantitatifs de cette ressource et de son utilisation, puis de nous présenter les pistes de solutions qui se dessinent pour l'agriculture.

Suit le dossier *Décryptage* consacré au microbiote, très prometteur en termes de santé publique et domaine de recherche emblématique sur lequel INRAE est pionnier.

Enfin, nos forêts souffrent et pourtant nous avons tant besoin d'elles. Le dossier *Futurs* révèle ce qui a changé dans ces socio-écosystèmes qui semblent pourtant immuables, et présente les solutions envisagées pour favoriser leur adaptation à de nouvelles conditions de vie.

Vous avez été nombreux à nous dire votre plaisir à lire *Ressources* #1. Nous espérons que ce numéro vous satisfera tout autant. Continuez à dialoguer avec nous sur [inrae.fr/ressources](https://www.inrae.fr/ressources). La rédaction



Travaux d'approche

**Ces scientifiques analysent le comportement d'une vache face à une situation inhabituelle, dans le cadre du réseau pluridisciplinaire d'évaluation du bien-être animal dans les systèmes d'élevage.**

Centre Clermont – Auvergne-Rhône-Alpes

© INRAE - Christophe Maître

# L' AGRICULTURE VA - T - ELLE MANQUER D'EAU ?

Il n'y a pas d'agriculture sans eau.  
Comment préserver au mieux l'harmonie de ce couple millénaire assombrie par le changement climatique, avec une agriculture plus demandeuse et une eau moins accessible ? Systèmes agroalimentaires plus durables, partage de l'eau dans les territoires et politiques publiques d'accompagnement sont les pistes étudiées pour une meilleure gestion quantitative de l'eau.

Ce dossier est centré sur la gestion quantitative de l'eau en agriculture tout en soulignant son aspect indissociable de la gestion qualitative de l'eau.



# UNE RESSOURCE LIMITÉE À PRÉSERVER

Avec le changement climatique, l'eau douce, en quantité finie sur la planète, va devenir plus difficile d'accès. L'agriculture est à la fois consommatrice d'eau et solution pour limiter le changement climatique, à condition de l'orienter vers des pratiques adaptées. C'est tout l'enjeu de cette équation à multiples inconnues.

## État des lieux.

L'eau est un bien commun, une ressource vitale, différente des autres. Contrairement à un minerai que l'on extrait à un endroit donné, l'eau change d'état entre ses formes solide, liquide et gazeuse. Elle se déplace entre différents compartiments en interaction : atmosphère, continents, océans. Elle décrit un cycle qu'il est essentiel d'avoir à l'esprit, car ce qui est prélevé à un endroit a inévitablement des conséquences ailleurs. La connaissance de tous les termes de ce cycle est nécessaire pour répondre à une question devenue cruciale pour nous, les humains, mais aussi pour les écosystèmes dont nous faisons partie : allons-nous manquer d'eau ?

### Une ressource limitée et renouvelable, jusqu'à un certain point

Le cycle de l'eau est un cycle fermé, sans apports ni pertes à l'extérieur de la planète. Le volume total d'eau présent sur Terre semble énorme mais l'eau douce (glaciers, lacs, cours d'eau, nappes souterraines) en représente moins de 3%, dont deux tiers sous forme de glace. De plus, l'eau douce est inégalement répartie dans le monde.

L'eau douce utilisée par l'être humain n'est pas détruite, elle est en partie retraitée et retourne dans le cycle. Cependant, une part de cette eau peut être rendue inutilisable à cause de la pollution. En effet, même si une grande partie des contaminants que nous rejetons (métaux, médicaments, détergents, microplastiques, pesticides, micro-organismes, etc.) est dégradée ou retenue dans le sol, ou encore traitée dans les stations de traitement des eaux usées, certains d'entre eux peuvent résister aux procédés de traitement, ou être entraînés par la pluie et se retrouver dans les eaux de surface ou dans les nappes souterraines. Si les teneurs en contaminants dépassent les limites admissibles, l'eau peut être rendue inutilisable pour certains usages. C'est ainsi qu'en France, plusieurs milliers de captages d'eau destinée à la consommation humaine ont été fermés du fait d'un dépassement des normes de qualité<sup>1</sup>. Par ailleurs, la concentration des contaminants augmente quand la quantité d'eau qui les dilue diminue, ce qui implique un lien étroit entre les notions de quantité et de qualité de l'eau, avec des conséquences importantes notamment pour la

### RESSOURCES EN EAU DOUCE



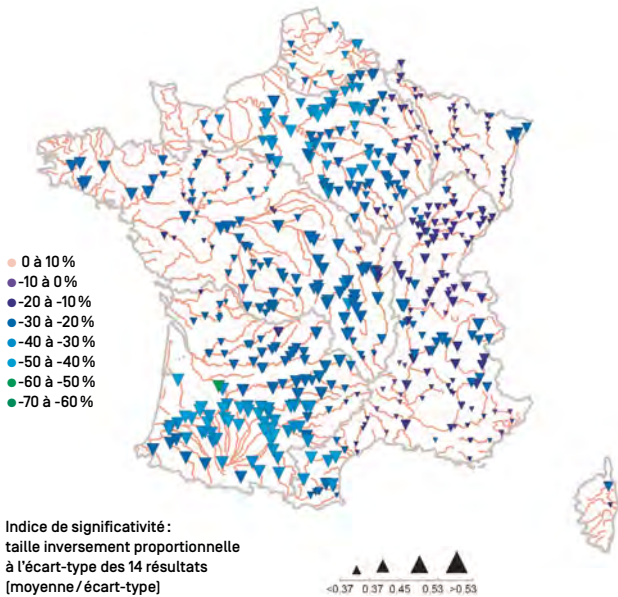
● eau douce disponible sur la planète

● 69%

● eau douce utilisée par l'humanité / par an (en partie recyclée)

Source : Abbott B.W. et al. 2019. *Nature Geoscience* 12, 533-540

**BAISSE DU DÉBIT MOYEN DES COURS D'EAU  
ANTICIPÉE POUR 2046-2065**

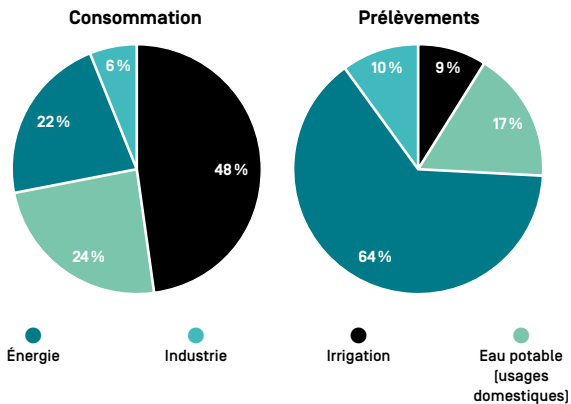


Comparaison avec les moyennes  
sur la période 1961-1990, avec  
des hypothèses de réchauffement  
d'environ 2°C et une baisse des

précipitations annuelles de l'ordre  
de 5 %.

Source : INRAE, projet EXPLORE 2070, porté  
par le ministère de la Transition écologique.

**CONSOMMATIONS ET PRÉLÈVEMENTS D'EAU EN FRANCE  
PAR SECTEUR D'ACTIVITÉ**



**Eau consommée =  
eau prélevée – eau restituée.**  
L'eau de pluie utilisée directement par  
les cultures n'est pas comptabilisée.

Sources : Agences de l'eau / SOes 2012  
(données prélèvements), rapport  
annuel 2010 du Conseil d'État (données  
consommations).

vie des écosystèmes aquatiques (lacs, rivières...). Une solution pour augmenter à grande échelle le volume d'eau douce utilisable consiste à dessaler de l'eau de mer ou de l'eau saumâtre. Énergivores et sources de pollution par le rejet de saumure (eau chaude très concentrée en sel et autres minéraux), les usines de dessalement se multiplient néanmoins dans certaines régions du monde où elles apparaissent comme l'ultime solution, particulièrement au Moyen-Orient et en Afrique du Nord. Elles produisent actuellement 2% de l'eau potable à l'échelle mondiale.

L'eau est donc une ressource en quantité limitée. Elle se renouvelle plus ou moins rapidement et plus ou moins complètement selon la capacité d'épuration du système considéré (territoire, pays).

**Des risques de manque d'eau induits  
par le changement climatique**

Les résultats du projet Explore 2070 (voir carte ci-contre) montrent que le débit moyen des rivières en France devrait diminuer fortement d'ici 30 ans, jusqu'à 50% dans le Sud-Ouest et le Bassin parisien.

Ces résultats au niveau français illustrent une évolution globale liée au changement climatique. En effet, l'élévation de la température moyenne de l'air augmente l'évaporation de l'eau à partir des masses d'eau, du sol et des plantes, et affecte le régime des précipitations : davantage de pluies fortes dans les zones tempérées et humides, avec une augmentation des pluies hivernales, moins de pluies dans les régions méditerranéennes et tropicales. Au final, le réchauffement climatique accélère le cycle de l'eau avec plus d'évaporation et plus de pluies extrêmes qui convergent vers les océans sans recharger les nappes.

Le réchauffement climatique provoque également l'augmentation probable de la fréquence et de →

**Le débit moyen  
des rivières en  
France devrait  
diminuer fortement  
d'ici 30 ans.**

l'intensité des inondations, des vagues de chaleur et sécheresses. Le réchauffement étant plus marqué aux pôles, il induit aussi une perte importante des stocks d'eau douce au profit des océans avec la fonte des glaciers et des calottes glaciaires. Et si la tendance actuelle se poursuit, il sera à l'origine de la montée du niveau de la mer, estimée entre + 60 cm à 110 cm d'ici 2100. Ainsi, toutes les projections des scientifiques montrent qu'il y aura redistribution des ressources en eau, au niveau national comme au niveau mondial. Même si le volume total d'eau de la planète reste constant, il y aura des risques de manque d'eau douce plus ou moins drastiques selon les territoires, les saisons et les années.

#### L'agriculture consomme de l'eau et la « déplace »

En France, l'agriculture, au travers de l'irrigation essentiellement, représente environ 9 % des prélèvements d'eau, mais 48 % de la consommation (voir schémas p.17). C'est le secteur qui « consomme » le plus d'eau, dans le sens où l'eau prélevée par les plantes n'est pas restituée localement : elle est évapotranspirée<sup>2</sup> et réintègre le cycle sous forme de vapeur, avant de retomber ailleurs sous forme de précipitations. Si l'on se



place du point de vue local, l'eau est donc « perdue », mais en réalité, on pourrait dire qu'elle est « déplacée » dans le cycle. Au contraire, l'eau utilisée pour refroidir des centrales thermiques classiques ou nucléaires, ou l'eau utilisée pour la consommation domestique, est partiellement ou totalement restituée, le plus souvent à proximité du point de prélèvement. Cette eau peut donc être réutilisée sous réserve de respecter certains critères, notamment en termes de température et de qualité. Les points de rejet peuvent malgré tout se situer à distance du point de prélèvement, en particulier dans le cas de dérivation (canaux). Dans un contexte de tension de plus en plus forte sur la ressource en eau, le partage de l'eau entre les différents secteurs d'activité devient un enjeu majeur.

#### L'agriculture, source de solutions

L'agriculture, consommatrice d'eau et émettrice de gaz à effet de serre, est souvent montrée du doigt comme étant l'une des causes majeures du dérèglement climatique, mais elle est aussi source de solutions, notamment par sa capacité à stocker du carbone dans les végétaux et dans les sols. Ce potentiel est significatif, comme le montre l'initiative « 4 pour mille » soutenue par INRAE<sup>3</sup> (voir ci-contre).

Face à un risque de manque d'eau, il faut concevoir de nouveaux systèmes agricoles qui soient certes économes en eau, mais qui agissent aussi sur la cause du manque d'eau, c'est-à-dire qui atténuent le réchauffement climatique, en favorisant le stockage de carbone, mais surtout en diminuant les émissions de gaz à effet de serre (gaz carbonique - CO<sub>2</sub>, méthane - CH<sub>4</sub> et protoxyde d'azote - N<sub>2</sub>O).

La nécessaire reconception de l'agriculture, pluviale ou irriguée, est abordée dans les pages qui suivent, tout comme les leviers pour une meilleure gestion de l'eau. ●

1. [www.eaufrance.fr/repere-captages-fermes](http://www.eaufrance.fr/repere-captages-fermes)

2. On appelle évapotranspiration la somme de l'évaporation de l'eau du sol et de la « transpiration » des plantes, qui rejettent

dans l'atmosphère par les pores de leurs feuilles la quasi-totalité de l'eau qu'elles absorbent.

3. [www.inrae.fr/actualites/stocker-4-1000-carbone-sols-potentiel-france](http://www.inrae.fr/actualites/stocker-4-1000-carbone-sols-potentiel-france)

INITIATIVE

## 4 pour mille

L'initiative « 4 pour mille », lancée lors de la COP21 à Paris en 2015, avec une contribution significative d'INRAE, repose sur l'hypothèse qu'une augmentation annuelle de 4‰ du stockage de carbone dans les sols mondiaux (soit  $1500 \times 4‰ = 6$  milliards de tonnes) permettrait de compenser l'augmentation annuelle des émissions de CO<sub>2</sub> liées aux activités humaines (4,3 milliards de tonnes).

INRAE a montré qu'en France, le plus gros potentiel de stockage de carbone se trouve dans les sols des grandes cultures, grâce à des pratiques comme le développement de couverts végétaux intermédiaires et l'agroforesterie [voir p. 29]. Ce calcul s'entend sous condition de préserver les zones de stockage de carbone existantes (forêts, prairies, zones humides) en stoppant l'artificialisation des terres.

## 4,3 milliards de tonnes de carbone

augmentation annuelle des émissions mondiales de CO<sub>2</sub> liées aux activités humaines (moyenne sur la période 2009-2018)

CHANGEMENT CLIMATIQUE

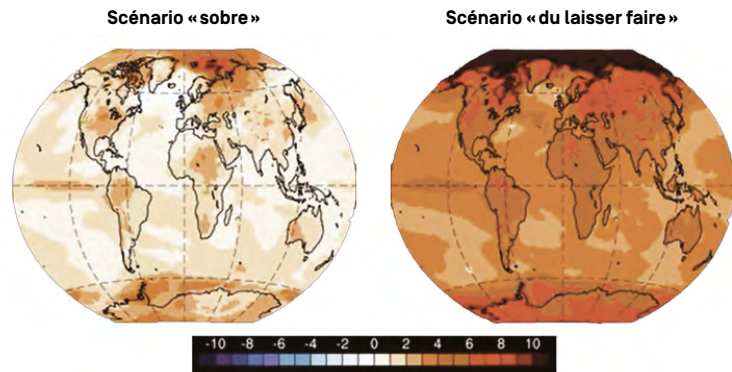
## Un phénomène d'une ampleur inédite

Depuis 1900, les émissions de gaz à effet de serre liées aux activités humaines ont provoqué un réchauffement terrestre moyen de + 1,07 °C. Si l'humanité continue sur la tendance actuelle [scénario du « laisser-faire »], elle provoquera un réchauffement supplémentaire de + 6 °C en moyenne à l'horizon 2100 [jusqu'à 10 °C aux pôles], ce qui implique un état de la planète que nous ne pouvons même pas imaginer. Le scénario « sobre » (+ 1 °C en 2100)

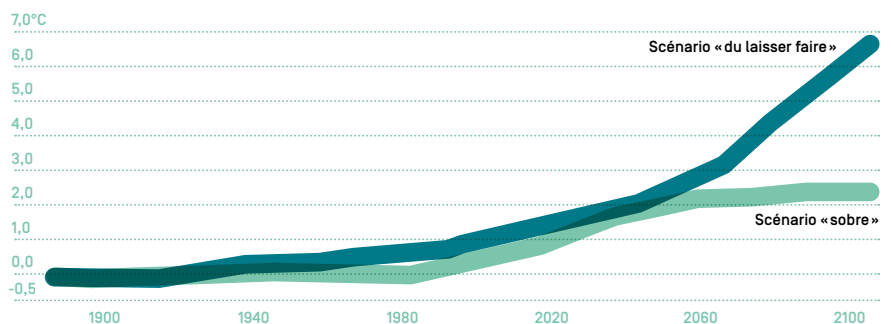
suppose d'atteindre la neutralité carbone en 2050. Entre ces deux scénarios extrêmes, plusieurs scénarios divergent à partir de 2050 et nous ne savons pas ce qu'il adviendra finalement. Seule certitude, compte-tenu de l'inertie du système, l'avenir dépend de nos actions actuelles en termes d'atténuation. Cette évolution est confirmée par le 6<sup>e</sup> rapport du GIEC [groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat], paru en août 2021. Il est à noter que non seulement l'évolution anticipée par le GIEC s'est confirmée jusqu'à présent, mais aussi que la confiance accordée aux projections pour le futur s'est accrue grâce aux progrès des modélisations.

### ÉVOLUTION DE LA TEMPÉRATURE MOYENNE DU GLOBE EN FONCTION DU TEMPS SELON LES DEUX SCÉNARIOS EXTRÊMES DU 6<sup>e</sup> RAPPORT DU GIEC

Source : GIEC, traitement Christophe Cassou, CNRS-CERFACS



### CHANGEMENT DE TEMPÉRATURE MOYENNE DE L'ATMOSPHÈRE



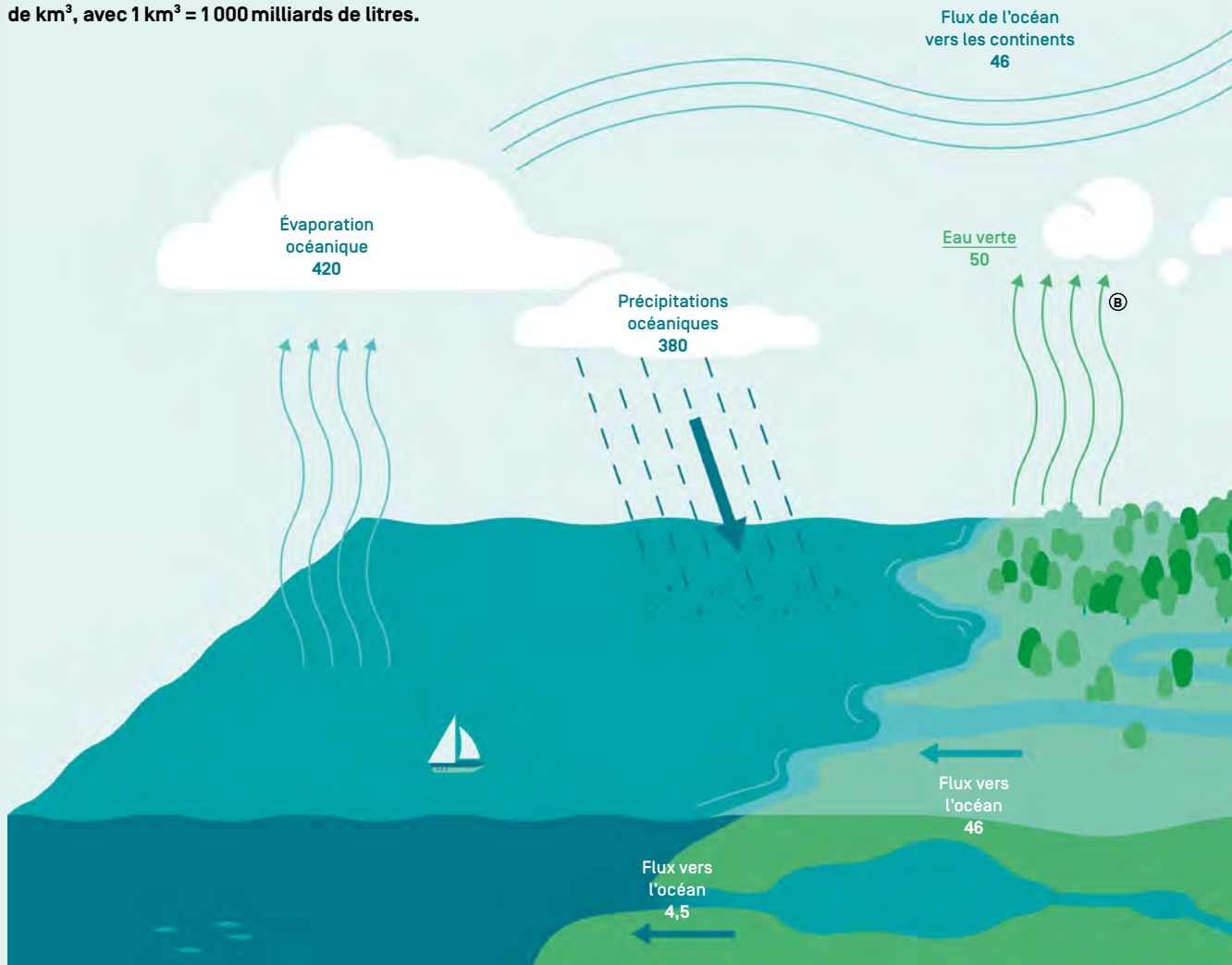
# Le cycle de l'eau

Le volume total d'eau (douce et salée) sur Terre est constant. La majeure partie est composée d'eau salée. L'eau douce, moins de 3% du total, se déplace entre différents compartiments [atmosphère, continents, océans], en décrivant un cycle sous différentes formes : vapeur, pluies, glace et neige. De cette circulation et de ces équilibres dépend la vie sur Terre.

Ci-dessous : flux mondiaux par an en milliers de km<sup>3</sup>, avec 1 km<sup>3</sup> = 1 000 milliards de litres.

Notes : marges d'erreur non représentées, entre 10 et 50 %, plus grandes pour la recharge des nappes et pour l'eau grise utilisée.

Fortes variations annuelles et interannuelles non représentées. D'après Abbott B.W. et al. 2019. *Nature Geoscience* 12, 533-540.



## LES FLUX

**Répartition des pluies**  
Plus de la moitié des précipitations annuelles ④ passe dans le sol et dans les végétaux (cultures, forêts et autres espaces naturels), avant d'être majoritairement évapotranspirée ⑤. C'est l'eau verte.

Le reste des pluies passe dans les cours d'eau ③, les lacs et les nappes ②. C'est l'eau bleue.

**Utilisation humaine mondiale annuelle d'eau douce**  
Eau verte : utilisée pour les cultures et l'élevage, majoritairement évapotranspirée.

Eau bleue : utilisée pour l'agriculture (irrigation), l'industrie, la production d'énergie, l'eau potable.

Eau grise : eaux usées domestiques et industrielles.

## ACTIONS

**Éviter les pertes d'eau douce vers la mer**  
→ Retenues d'eau.

→ Stockage d'eau dans le sol  
Favoriser l'infiltration, diminuer l'érosion, enrichir en matière organique (couverts, élevage), agriculture de conservation des sols.

→ Infrastructures écologiques pour diminuer le ruissellement et favoriser le stockage dans les paysages : zones humides, haies, bandes enherbées, fossés.

→ Réutilisation des eaux usées après traitement.

≈ 1,4 milliard de km<sup>3</sup>

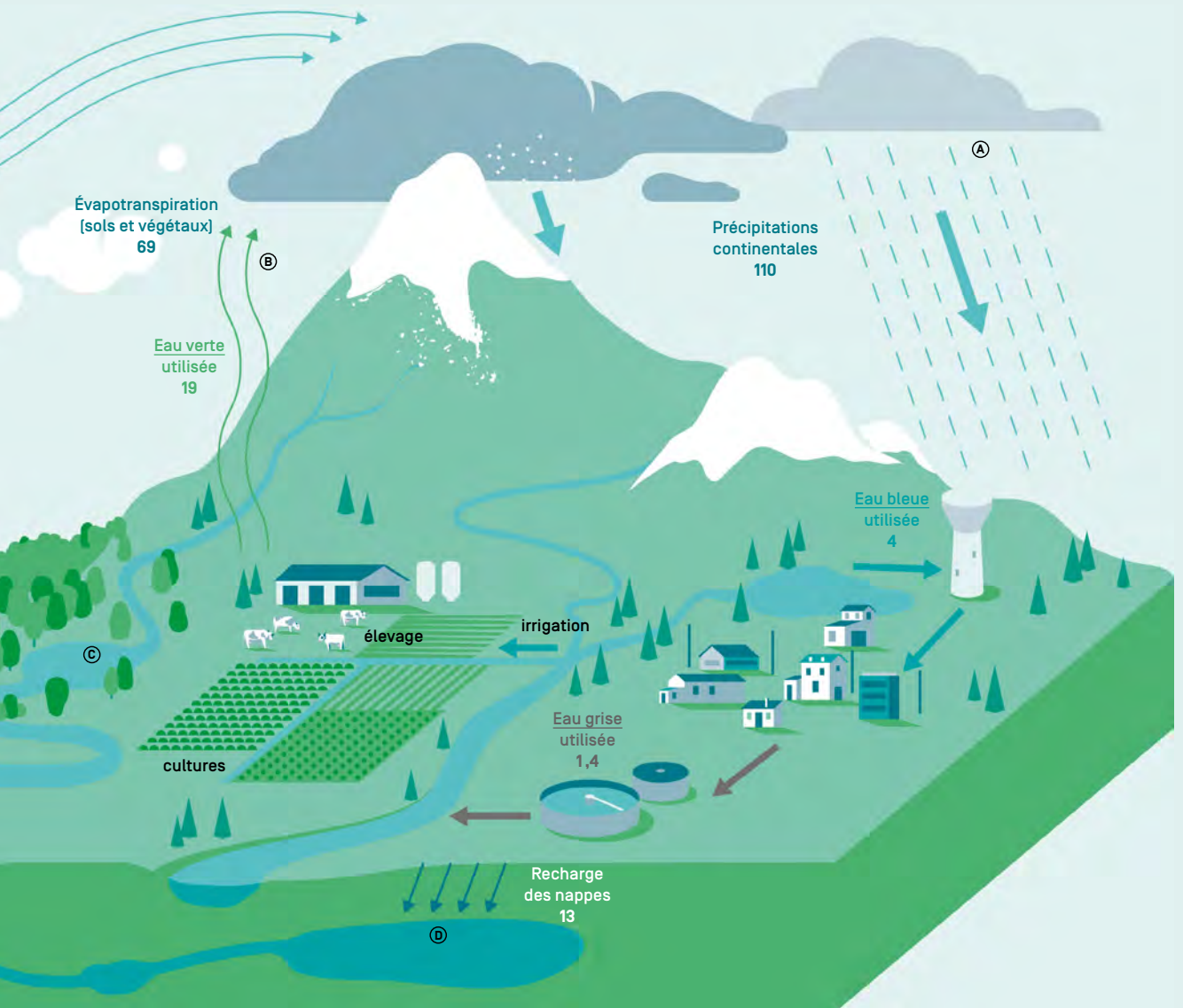
Volume total d'eau sur la planète

≈ 35 millions de km<sup>3</sup>

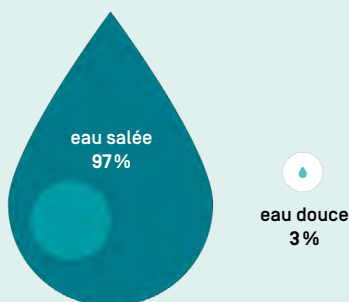
Volume total d'eau douce sur la planète

≈ 24 000 km<sup>3</sup>

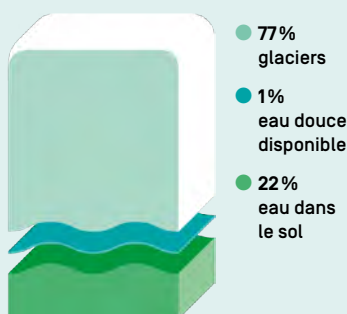
Volume d'eau douce utilisée par l'homme par an (environ 6 fois le volume de la Manche)



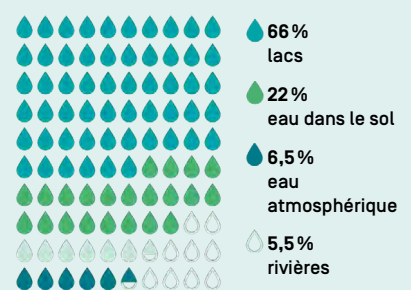
EAU DE LA TERRE



EAU DOUCE



EAU DOUCE DISPONIBLE



# LE PARTAGE DE L'EAU DANS LES TERRITOIRES

Avec une ressource moins disponible, le partage de l'eau devient un enjeu crucial pour l'avenir des activités humaines mais aussi des écosystèmes naturels. Pour éviter les conflits, les méthodologies de concertation entre les acteurs se développent et se perfectionnent.

## Explications.

Lancé en mai 2021 par le Gouvernement, le « Varenne agricole de l'eau et de l'adaptation au changement climatique »<sup>1</sup> fait suite aux Assises de l'eau de 2019, lesquelles ont défini une série d'actions, dont la mise en place d'une gestion collective et de règles de partage de l'eau, avec pour objectif de réduire les prélèvements liés à tous les usages (domestiques, industriels et agricoles) de 10 % d'ici 2025 et de 25 % d'ici 2035. Comment atteindre cet objectif ? Au cœur du dispositif se trouve la mise en place de « projets de territoire pour la gestion quantitative de l'eau » (PTGE), encouragée par l'État<sup>2</sup>. Les PTGE établissent, mettent en œuvre et évaluent un programme d'actions pour équilibrer les besoins et les ressources en eau au sein du territoire, tout en préservant les milieux naturels. Ils intègrent une vision prospective prenant en compte le changement climatique. Ils doivent associer toutes les parties prenantes, ouvrant le dialogue en particulier entre les agriculteurs et les autres acteurs de la société, dont les associations de protection de l'environnement. Plus de soixante PTGE sont validés à ce jour, et une quarantaine sont en cours

d'élaboration. Concrètement, un PTGE s'applique à un bassin versant (100 à 1 000 km<sup>2</sup>), souvent caractérisé par une problématique spécifique (manque d'eau, inondations, qualité de l'eau) à concilier avec différentes activités économiques (production, transformation, tourisme). Le PTGE s'appuie sur des structures de gouvernance de l'eau existantes et légitimes, dont les Commissions locales de l'eau (CLE), sortes de « parlements de l'eau » qui réunissent toutes les parties prenantes et qui élaborent le SAGE, Schéma d'aménagement et de gestion des eaux<sup>3</sup>. Un bassin versant est défini comme le territoire drainé par un cours d'eau et ses affluents, une sorte de « cuvette » dans laquelle les eaux convergent vers un même point de sortie appelé exutoire (voir figure p. 25).

### Les territoires de partage de l'eau en France

On compte en France métropolitaine sept grands territoires plus ou moins structurés autour de grands fleuves français (Adour-Garonne, Artois-Picardie, Loire-Bretagne, Rhin-Meuse, Rhône-Méditerranée, Seine-Normandie, Corse). →

# L'INGÉNIERIE DE LA PARTICIPATION SUR LE TERRAIN

## NOUVELLE-CALÉDONIE

### 1<sup>re</sup> politique de l'eau concertée

À partir de la méthode COOPLAN, en complément de l'apport d'un cabinet conseil, un processus participatif a permis de construire en neuf mois une politique de l'eau partagée en Nouvelle-Calédonie. Adoptée par le Congrès de l'île à l'unanimité en 2019, le processus a impliqué 1 Calédonien sur 600. Pourtant, dans cette collectivité d'outre-mer, la gouvernance de l'eau est particulièrement complexe, avec différents niveaux d'autorité : l'État, les provinces et communes, et les chefferies

traditionnelles qui protègent les sources sacrées. Des propositions innovantes ont émergé, comme par exemple donner à l'eau le statut de personnalité juridique vivante. Des représentants de l'industrie minière ont fait bouger leurs lignes en approuvant la sanctuarisation de ressources en eau stratégiques dans certains massifs riches en nickel, s'interdisant du même coup de les exploiter. À l'issue du processus, 90 % des participants disaient avoir mieux compris les problèmes liés à l'eau.

## SOCIÉTÉ DE SERVICES

### Lisode, expert en concertation

Les travaux des scientifiques d'INRAE ont inspiré la création, en 2008, de la société coopérative Lisode, qui propose des services et conseils en ingénierie de la participation pour aider les acteurs publics à conduire leurs projets d'aménagement. À ce jour, Lisode a accompagné une centaine de processus de

concertation et la formation d'un millier de professionnels.

« Nous continuons à collaborer avec la recherche pour mieux cerner quelles sont les conditions de réussite des processus de concertation », analyse Mathieu Dionnet, cofondateur de Lisode.

## LES USSES

### Les citoyens changent leur vision sur la gestion de l'eau

Évoluer dans leurs positions, c'est ce qu'ont fait les citoyens des Ussets, près d'Annecy, un territoire en tension pour l'eau, très rural, mais aussi très peuplé car proche du bassin économique genevois. Alors qu'ils pensaient que les agriculteurs étaient les premiers consommateurs d'eau, les citoyens ont réalisé que leur propre consommation était bien supérieure et ont proposé un plan d'action pour la réduire. Les animateurs de ce projet précurseur de PTGE ont été formés par des scientifiques d'INRAE. La concertation, qui a duré deux ans (2017-2018), a privilégié des événements festifs : randonnées, bistrot de discussions, théâtre et jeux de rôle, souvent intégrés dans d'autres manifestations (fêtes paysannes, fêtes de la Nature), afin de toucher le plus de personnes possible. Selon un élu, « la démarche a changé le regard des citoyens sur le syndicat (Syndicat de Rivières les Ussets, ndr) dans son rôle de gestion globale de l'eau, au-delà des travaux visibles sur la rivière comme couper les arbres, etc. ». Une animatrice, inspirée par ce qu'elle a vu lors d'un atelier de théâtre, livre cette réflexion en substance : « Il ne s'agit pas de dire aux agriculteurs : "il faut arroser moins votre maïs", mais plutôt : "il faut voir si on peut cultiver autrement, une autre variété, une autre culture". Il ne s'agit pas de dire : "on ne fait pas", mais de dire : "il faut collectivement faire autrement". » Le retour d'expérience des Ussets, ainsi que quatre autres retours de terrain représentatifs du bassin Rhône-Méditerranée-Corse, ont été mis à disposition des agences de l'eau grâce à un guide diffusé par INRAE.

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

## Évaluer le rapport coût/bénéfice

L'évaluation économique et financière des projets de territoire est une approche à développer : pour cela, INRAE propose des outils éprouvés sur le terrain.

« Construire des infrastructures, restaurer des canaux, conseiller et former les acteurs, élaborer et diffuser des informations, tout cela a un coût, à mettre en regard avec les bénéfices pour le territoire. Pourtant, peu de PTGE sont évalués économiquement pour l'instant », constate Sébastien Loubier, économiste à INRAE. Pour développer cet aspect, le ministère en charge de l'Agriculture a sollicité les scientifiques d'INRAE qui ont élaboré un guide méthodologique d'analyse économique et financière des PTGE à composante agricole<sup>1</sup>. Ce guide propose aux porteurs de projets une méthodologie pour évaluer économiquement les scénarios de territoire à échéance de 40 à 50 ans. La méthode consiste à comparer la situation en l'absence de projet et la situation obtenue grâce au projet. En effet, dans des territoires en tension pour l'eau, ne rien faire peut conduire à un appauvrissement du territoire : moins d'eau dans les cours d'eau, moins de prélèvements, moins d'agriculture et de services publics.

### Tests grandeur nature

La méthodologie a été testée en conditions réelles sur plusieurs PTGE. L'exemple du PTGE « Hauts de Provence rhodanienne » (2017-2020) illustre bien les liens étroits qui existent entre agriculture et gestion de l'eau. Dans ce territoire situé près d'Avignon, l'objectif est de

protéger la nappe surexploitée en diminuant les prélèvements de 30 %. Cependant, la principale richesse de la région repose sur des cultures à haute valeur ajoutée dont les besoins en irrigation augmentent avec le changement climatique : viticulture de grands crus AOC (Appellation d'origine contrôlée), plantes aromatiques ou à parfum. Le projet, porté par la chambre d'agriculture du Vaucluse, consiste à apporter de l'eau venant du Rhône vers les bassins déficitaires au moyen de canalisations. L'évaluation conclut que le projet de restauration des canalisations et d'augmentation des surfaces irriguées pour les cultures, bien que coûteux, est viable économiquement en regard des bénéfices. En effet, la vigne est la principale ressource de ce territoire, et elle peut apporter d'autres atouts comme l'œnotourisme. Dans cette région non côtière, le tourisme seul ne peut suffire au développement du territoire.

### Évaluation économique

« L'évaluation économique est importante car elle indique si le scénario étudié est économiquement souhaitable et rentable lorsque l'on se place du point de vue de chaque catégorie d'acteurs. Mais elle ne dit pas si ce scénario est le meilleur pour la gestion des ressources en eau, ou pour d'autres critères environnementaux qui sont aussi à prendre en compte. Dans le cas du projet dans le Vaucluse, on peut s'interroger sur son avenir à long terme, car si le Rhône apparaît pour l'instant comme une ressource sécurisée, nous ne savons pas pour combien de temps. Pour préserver la culture de la vigne, il faut penser à des solutions autres que l'irrigation, telles que l'adaptation de la vigne à la sécheresse, à travers différents leviers (choix des cépages ou des porte-greffes, pratiques culturales etc.). En contrepartie d'un accès à l'eau d'irrigation, certains viticulteurs

pourraient tester ces solutions sur une partie de leur exploitation », analyse Sébastien Loubier, qui a fourni un appui méthodologique au bureau d'étude mandaté sur le projet.

### L'importance de la collecte de données

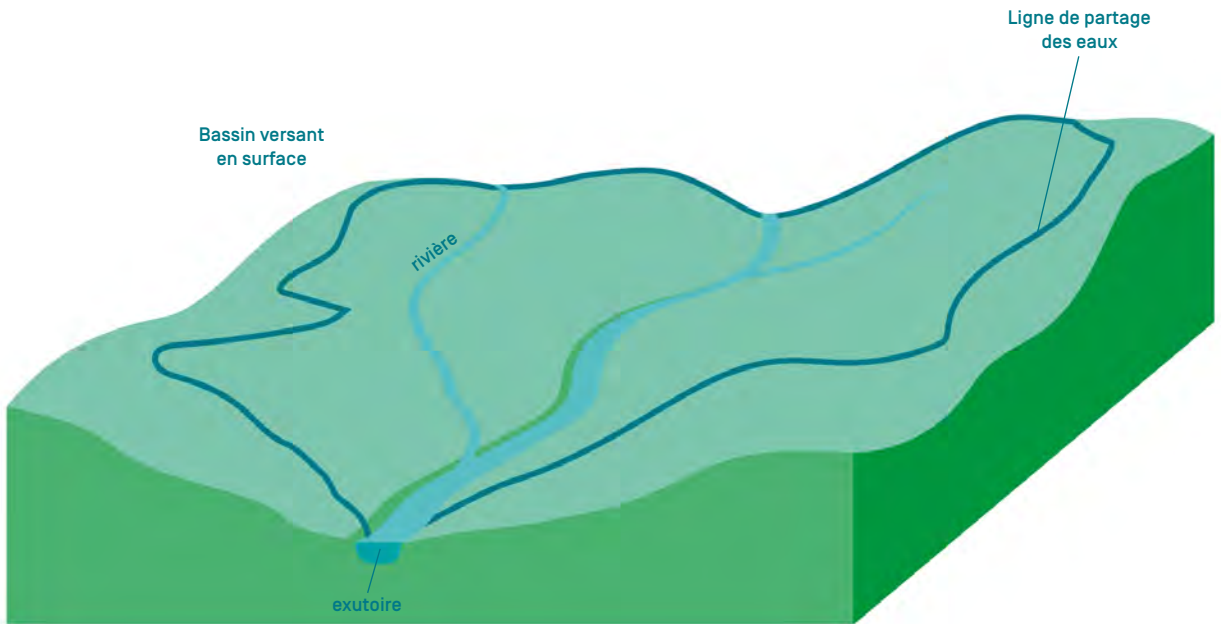
« L'évaluation économique demande de recueillir de nombreuses données auprès des agriculteurs, des services de l'État, des chambres d'agriculture, de l'Agence de l'eau, etc. C'est au prix de cette collecte d'information de qualité que les analyses économiques peuvent permettre d'objectiver les décisions et de dépasser les positions de principe et les rapports de force. C'est aussi un premier lieu de concertation. C'est un investissement en temps et en moyens nécessaire au regard des enjeux », conclut Patrice Garin, agrogéographe à INRAE et coauteur du guide méthodologique d'analyse économique et financière des PTGE à composante agricole.

## La collecte de données est un investissement en temps et en moyens nécessaires au regard des enjeux.

1. Analyse économique et financière des Projets de Territoire pour la Gestion de l'Eau (PTGE) à composante agricole : principes méthodologiques et exemples d'applications,

S. Loubier, P. Garin, E. Hassenforder, M. Aucante, C. Lejars, 2021.

[www.g-eau.fr/index.php/fr/productions/methodes-et-outils](http://www.g-eau.fr/index.php/fr/productions/methodes-et-outils)



Les grands bassins sont eux-mêmes divisés en sous-bassins, emboîtés les uns dans les autres. Pour élaborer et évaluer des scénarios de gestion de l'eau, il est nécessaire de connaître le fonctionnement hydrologique de ces bassins versants. « Les sept grands bassins français ont été modélisés, avec plus ou moins d'incertitudes, explique Vazken Andréassian, hydrologue à INRAE. En effet, certains bassins sont complexes, avec des nappes souterraines dont les ressources sont difficiles à estimer. »

**L'ingénierie de la participation, clé de voûte des projets de territoires**

L'accès et le partage de l'eau peuvent donner lieu à des conflits graves. Le drame de Sivens (Tarn), qui a vu la mort d'un jeune écologiste lors d'une manifestation contre la construction d'un barrage en 2014, l'a rappelé en France. Cet évènement a contribué à faire émerger des lois et ordonnances imposant la participation de toutes les parties prenantes dès la conception des projets<sup>4</sup>. Cette co-construction « en amont » prend du temps. Elle requiert des méthodes solides et de la formation, car en France, elle est encore peu pratiquée par les élus et les porteurs d'enjeux, plus habitués à ce que la concertation ait lieu

↑  
Principe de bassin versant, vue en surface.

après que le diagnostic et les pistes d'action ont été posés par les experts et les décideurs. Innovants dans le domaine de l'ingénierie de la participation, les scientifiques d'INRAE proposent des outils et surtout une démarche. Selon Nils Ferrand, qui se définit comme un « expérimentaliste de la transformation », « une transformation imposée génère une résistance du corps social. Les modèles experts ne suffisent pas, il faut les associer aux connaissances locales ». C'est ce que propose un ensemble d'outils appelé COOPLAGE<sup>1</sup>, développés depuis les années 2000 : co-construire des stratégies combinant des bases scientifiques et des connaissances profanes et rendre les acteurs plus autonomes. Les outils COOPLAGE peuvent être déclinés à plusieurs échelles et dans plusieurs contextes. Ils sont utilisés actuellement dans plus de quarante pays pour aborder divers enjeux socio-environnementaux, grâce à des programmes de formation des acteurs et un Mooc (Terr'Eau & co). C'est ainsi, par exemple, que depuis 2018, des agents de l'administration tunisienne ont été formés pour développer une approche plus participative de la gestion territoriale dans six zones rurales. Une démarche analogue a été conduite dans le Ceará au Brésil.

1. COOPLAGE: Coupler des Outils Ouverts et Participatifs pour Laisser les Acteurs s'adapter pour la Gestion de l'Eau.



© INRAE - Christophe Maître

Ces outils, d'une grande diversité, couvrent toutes les phases de la participation, à commencer par sa préparation (voir p.28). Pour légitimer le mode de décision, l'outil PREPAR (Pré-Participation) propose de définir en amont le rôle dévolu aux différents acteurs, puis de s'engager sur la manière dont leurs propositions seront prises en compte. C'est une innovation de taille qui implique que les décideurs acceptent de débattre de ce plan de participation. Deuxième condition d'efficacité: que les acteurs puissent élaborer un diagnostic partagé, grâce à différents supports - jeux de rôle, fiches, schémas ou matrices (outils WAT-A-GAME) -, partager leur vision de la justice sociale (JUST-AGRID) et construire ensemble un plan d'action territorial cohérent (outil COOPLAN). Enfin, la méthode ENCORE permet d'évaluer la qualité de la démarche participative au cours du processus plutôt qu'*a posteriori*, et ainsi de faciliter les ajustements nécessaires. Cette panoplie de méthodes incite les acteurs à se questionner sur eux-mêmes à toutes les étapes du processus, dans une démarche d'ouverture et de maîtrise du changement. « *Le cheminement, le dialogue, la confiance restaurée sont les éléments clés pour construire collectivement un projet de territoire durable* », résume Nils Ferrand. ●

↑  
**Paysage sur les bords de la Dordogne. On y distingue un taillis à courte rotation de peupliers au 1<sup>er</sup> plan, une futaie de peupliers en arrière plan, et des peupliers noirs sauvages entre les deux.**

1. Varenne de l'eau: travail collectif, initié par les ministères en charge de l'Agriculture et de l'Environnement, et impliquant: chambres d'agriculture, collectivités, services et opérateurs de l'État, scientifiques, usagers de l'eau, associations de protection de l'environnement... Il vise à construire une feuille de route opérationnelle pour répondre aux enjeux de gestion de l'eau en lien avec l'agriculture. Toutes les régions ont déjà engagé leur phase de diagnostic et d'identification de leviers selon une méthodologie commune.

2. PTGE: définis par les instructions du Gouvernement (4 juin 2015 et du 7 mai 2019) à son administration, (préfets coordonnateurs de bassin, préfets de région...) pour encourager la démarche là où elle est souhaitable.

Porteur d'enjeu: président de la Commission locale de l'eau (CLE) ou président d'un établissement public territorial de bassin (EPTB) ou d'aménagement et de gestion des eaux (EPAGE) ou encore personnalité reconnue sur le territoire et dans le domaine de la gestion de l'eau.

3. Défini par bassin versant, le SAGE met en œuvre une gestion intégrée de la ressource en eau et des milieux aquatiques en définissant des objectifs de qualité des eaux et de bon fonctionnement des milieux. Il comporte un règlement qui peut définir les usages prioritaires et les volumes impartis par usages.

4. Ordonnance 2016-1060 du 3 août 2016 sur le Dialogue environnemental.

## La modélisation pour objectiver le débat

3 questions à Delphine Leenhardt, agronome à INRAE

À l'initiative des scientifiques d'INRAE, un processus combinant participation, scénarisation et modélisation des impacts a été conduit sur un sous-bassin de l'Aveyron, pour étudier comment résoudre le déséquilibre hydrique récurrent dans ce territoire et dépasser les conflits entre acteurs. Delphine Leenhardt a encadré deux thèses de recherche-action sur ce sujet de 2011 à 2018.

### Quelle est la problématique sur ce territoire ?

Dans ce bassin, les prélèvements excèdent régulièrement le seuil autorisé pour maintenir le DOE<sup>1</sup>, entraînant des restrictions d'usage. Les conflits opposent les agriculteurs irrigants d'une part, dont beaucoup de producteurs de maïs, et d'autre part les défenseurs de l'environnement. Il y a beaucoup de parcelles irriguées autour de la rivière Aveyron. Les prélèvements pour l'irrigation sont compensés par des lâchers d'eau à partir de barrages en amont. Autour des affluents de l'Aveyron, il y a aussi près de 400 petites retenues collinaires individuelles, pas toujours entretenues, qui peuvent avoir des impacts sur

l'environnement. Dans ce contexte, nous avons comparé quatre scénarios que les acteurs souhaitaient explorer. Pour cela, nous avons utilisé le modèle MAELIA<sup>2</sup> qui fournit pour chaque scénario 28 indicateurs d'impacts sur l'eau, mais aussi sur la production agricole. Ce modèle intègre l'hydrologie, les décisions des agriculteurs (semis, irrigation...) et celles des gestionnaires de l'eau (lâchers d'eau, restrictions...). Il modélise chaque jour les décisions de plus de 1000 agriculteurs sur plus de 15 000 parcelles.

### Quels enseignements tirez-vous de l'étude des scénarios ?

Un premier scénario consiste à remplacer les petites retenues par trois grandes retenues dites « de substitution », remplies en hiver et utilisées en été. À surface irriguée constante, ce scénario se traduit par une augmentation des prélèvements (+24 %), ce qui peut s'expliquer par le fait que les irrigants ne sont plus contraints par le volume des petites retenues. C'est le scénario le plus critiqué, y compris par les agriculteurs, car il n'induit pas un gain de production agricole proportionnel et apparaît comme un gaspillage d'eau, sans compter les coûts liés à sa mise en place. Ce scénario présente néanmoins un intérêt pour la préservation des milieux aquatiques avec un DOE plus souvent assuré. Parmi les quatre scénarios, le plus efficace pour diminuer les prélèvements d'eau (-42 %) s'appuie sur les principes de l'agroécologie, puisqu'il repose sur la diversification des cultures : remplacer toutes les monocultures de maïs irrigué par des rotations maïs irrigué-tournesol-blé-colza. C'est aussi le scénario qui requiert le changement de pratiques le plus profond. Il entraîne également une diminution de marge brute de 9 %. Les deux autres scénarios : pilotage de l'irrigation par des

outils d'aide à la décision et suppression de l'irrigation en tête de bassin, donnent des résultats intermédiaires.

### Quels enseignements tirez-vous de la démarche participative ?

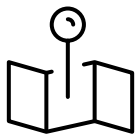
Un des points forts de cette étude, c'est que nous avons construit et évalué les scénarios avec les acteurs. Nous les avons répartis en groupes ayant des enjeux communs pour ne pas exacerber les conflits : les gestionnaires de l'eau, les défenseurs de l'environnement, la profession agricole, etc. En réalité, il y a eu dès le départ une curiosité réciproque entre les groupes et une envie de partager. Lors des discussions en commun, on a vu émerger des consensus, par exemple sur l'intérêt d'utiliser les outils d'aide au pilotage de l'irrigation, mais aussi des points de blocage, par exemple sur la création de retenues vue comme un frein à l'agroécologie, car encourageant l'irrigation et l'agriculture intensive. Nous avons observé en effet que le jugement des acteurs sur les scénarios ne prenait pas en compte les seules économies d'eau, mais aussi le modèle agricole associé : agroécologie versus agriculture intensive. Finalement, des propositions de consensus ont émergé, comme par exemple conditionner la création de retenues à des obligations contractuelles de pratiques agroécologiques. Ce travail montre tout l'intérêt d'une modélisation la plus précise possible des impacts des scénarios : en s'appuyant sur des indicateurs objectivés, on peut obtenir une réelle discussion, apaisée, entre des acteurs aux objectifs divergents.

1. Débit d'objectif d'étiage : Valeur minimale de débit, fixée par le SDAGE, à maintenir pour assurer la coexistence normale de tous les usages et le bon fonctionnement du milieu aquatique.

2. [maelia-platform.inra.fr](http://maelia-platform.inra.fr)

# PROJET DE TERRITOIRE POUR LA GESTION DE L'EAU [PTGE] : LES ÉTAPES D'ÉLABORATION

## 1. GOUVERNANCE



Définition et mise en place de la gouvernance

MÉTHODOLOGIE INRAE  
**Ingénierie de la participation**  
Formation des animateurs et des participants, planification de la participation [outil PREPAR]

## 2. OBJECTIFS



Mise en cohérence avec les SDAGE

MÉTHODOLOGIE INRAE  
**Dialogue de justice sociale**  
[outil JUST-A-GRID]

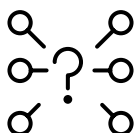
## 3. DIAGNOSTIC



État des milieux aquatiques, usages et besoins en eau, enjeux monétaires ou non

MÉTHODOLOGIE INRAE  
**Représentation du système**  
[outil WAT-A-GAME]

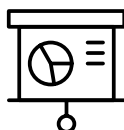
## 4. SCÉNARIOS



Établissement de scénarios de territoire

MÉTHODOLOGIE INRAE  
**Modélisation**  
Hydrologique, socio-économique, intégrée [outil MAELIA]

## 5. ANALYSE MULTICRITÈRES



Comparaison des scénarios

MÉTHODOLOGIE INRAE  
**Évaluation multicritères**  
[outil MAELIA]  
**Évaluation économique et financière**

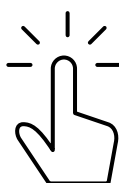
## 6. CHOIX DU SCÉNARIO



Plan d'action  
Mise en débat des analyses

MÉTHODOLOGIE INRAE  
**Construction du plan d'action**  
[outil COOPLAN]

## 7. MISE EN ŒUVRE DU PLAN D'ACTION



MÉTHODOLOGIE INRAE  
**Le processus de concertation est lui-même évalué en continu**  
[outil ENCORE]

# L'AGROÉCOLOGIE

## SOURCE DE SOLUTIONS

Préserver la ressource en eau, pour les humains et pour la planète, c'est à la fois l'économiser et agir sur la cause de sa raréfaction : le changement climatique.

Pour l'agriculture, c'est un double défi qui nécessite des changements rapides et profonds.

**Et si l'on regardait du côté de l'agroécologie ?**

Face aux changements globaux, l'évolution de l'agriculture doit s'envisager de façon systémique et aller au-delà de la seule production. Choix des espèces et races d'animaux, pratiques de culture, gestion du paysage, etc., sont à reconsidérer. Comment conduire cette transition ? Peut-elle être rapide, compte-tenu de l'urgence climatique ? Comment accompagner les agriculteurs qui en sont les premiers maillons ?

### **Pour une reconception de l'agriculture**

L'agroécologie est une des voies possibles pour concilier les différents enjeux qui se posent à l'agriculture. Elle propose un cadre cohérent en combinant plusieurs leviers (voir encadré) et implique un changement profond de démarche : plutôt que de cultiver la variété (ou d'élever la race animale) la plus performante dans un environnement homogène et contrôlé par l'utilisation d'intrants, il s'agit de combiner une diversité de variétés et d'espèces pour s'adapter à des conditions fluctuantes (voir p. 32). D'après Thierry Caquet, directeur scientifique Environnement d'INRAE, « pour les agriculteurs, la réussite de la transition agroécologique peut impliquer des investissements en termes de formation, de partage de savoir-faire, de

*mutualisation d'équipements... mais c'est aussi toute la chaîne de valeurs qui doit évoluer en partageant les coûts : adapter les outils de récolte, de collecte et de transformation à des produits plus diversifiés et parfois plus hétérogènes, mettre en place de nouvelles filières et de nouvelles pratiques de commercialisation, etc. En bout de chaîne, les consommateurs ont un rôle-clé à jouer, car leurs actes d'achat sont des leviers puissants pour faire changer l'ensemble du système. Il faut que la société toute entière évolue et pas seulement les agriculteurs... ». Le processus de co-construction de la transition agroécologique fait lui-même l'objet de recherches.*

Les travaux d'INRAE s'appuient sur des suivis d'exploitations agricoles, des dispositifs expérimentaux ou des *living labs* (laboratoires vivants), autant de lieux pouvant servir de démonstrateurs.

### **La transition peut être rapide**

Certains exemples montrent que la transition peut être rapide. Ainsi, à la suite de la suppression en avril 2015 des quotas laitiers et à la chute du prix du lait qui s'en est suivie, des éleveurs laitiers aveyronnais se sont convertis en agriculture biologique en deux ans seulement, passant pour certains d'un système zéro pâturage à sept mois →

## L'agriculture de conservation est-elle économe en eau ?

**Le projet BAG'AGES (2016-2021), coordonné par INRAE et soutenu par l'Agence de l'eau Adour-Garonne, visait à répondre à cette question au travers du suivi sur trois ans de 11 parcelles chez des agriculteurs et grâce à la modélisation.**

Par ses capacités de stockage de carbone, le sol est un levier majeur pour atténuer le changement climatique. C'est aussi le milieu nourricier des plantes et leur réserve d'eau. L'agriculture de conservation des sols repose sur trois piliers : l'absence de travail du sol, la diversification et l'allongement des rotations, et la protection des sols contre l'érosion par l'utilisation de couverts végétaux implantés entre les cultures dans les rotations. Mais quel est l'impact de ce système sur la ressource en eau ? Lionel Alletto et Olivier Therond, agronomes à INRAE, livrent leurs conclusions à deux échelles différentes, la parcelle et le territoire. À noter, sur trois sites, on a pu comparer des parcelles en agriculture de conservation et des parcelles labourées, dans les mêmes conditions de sol et de climat.

1. Réserve utile = quantité d'eau que le sol peut absorber et restituer à la plante

2. [maelia-platform.inra.fr](https://maelia-platform.inra.fr)

### « Pour une quantité d'eau égale, on observe un meilleur rendement en biomasse »

Lionel Alletto

« À l'échelle du territoire, il est difficile de savoir si les systèmes en agriculture de conservation permettent des économies d'eau, car certains choisissent d'irriguer leurs couverts avec l'eau économisée en diminuant les surfaces de maïs irrigué. Par contre, on observe qu'à quantité d'eau égale, on a un système plus productif en biomasse : + 15 % à 20 %. On a donc augmenté l'efficacité de l'eau. Il faudrait maintenant étudier ce qui se passerait si l'on réduisait graduellement l'irrigation du maïs dans ces systèmes. C'est un axe de recherche pour nos sites expérimentaux, car les agriculteurs peuvent difficilement prendre ce risque. De plus, nous devons améliorer nos connaissances pour sélectionner des variétés plus tolérantes au manque d'eau. Pourquoi obtient-on un meilleur rendement en biomasse ? Déjà, les plantes bénéficient d'un meilleur stock d'eau dans les sols : nous avons montré que la "réserve utile"<sup>1</sup> de ces sols augmentait de 8 à 15 % par rapport à des sols travaillés. L'eau s'y infiltre mieux, car même si les sols non travaillés sont plus denses, leurs pores sont mieux connectés, du fait de la présence de galeries de vers de terre et de réseaux de racines, qui peuvent aller en profondeur car elles ne sont pas arrêtées par les "semelles de labour". Autre raison possible : les plantes sont mieux nourries du fait d'une amélioration des associations symbiotiques, notamment mycorhiziennes, lorsque les sols sont maintenus couverts et peu travaillés. La rétention de l'eau dans les sols est aussi favorisée par les couverts d'intercultures, car même s'ils

consomment de l'eau, ils apportent au sol, une fois détruits, de la matière organique qui améliore le stockage de l'eau. Ils limitent aussi les pertes d'eau liées au ruissellement et freinent ainsi l'érosion du sol qui en découle. Enfin, les couverts ont un autre avantage : ils piègent du carbone. C'est pourquoi ils représentent le levier principal du projet 4 pour 1 000 (voir p. 19) pour stocker du carbone en grandes cultures. INRAE étudie une grande diversité de plantes de couverts, pures ou en mélange : fêverole, vesce, radis fourrager, navette, avoine rude, roquette, moutarde. »

### « Les couverts d'interculture n'ont pas d'impacts critiques sur la ressource en eau »

Olivier Therond

« Le modèle de simulation que nous utilisons, Maelia<sup>2</sup>, permet d'analyser finement les impacts des couverts végétaux et des rotations diversifiées (maïs, soja, tournesol, céréales...), car il prend en compte de nombreux paramètres : climat, sol, rotations, pratiques (semis, irrigation...), état des ressources en eau, etc. La principale crainte portait sur l'impact sur l'eau des couverts d'intercultures, car, s'ils ont l'avantage de capter du CO<sub>2</sub>, ils consomment de l'eau du sol, ce qui peut pénaliser la culture suivante, ainsi que la recharge des nappes et les écoulements vers les cours d'eau. La modélisation a dissipé cette crainte pour le bassin versant étudié, car elle montre que les couverts n'ont pas d'effets critiques sur la culture suivante, ni sur les débits des cours d'eau. Dans le cas particulier de sols superficiels ou si les pluies sont rares, il faut juste les détruire assez tôt pour que la réserve en eau du sol se reconstitue avant la levée de la culture suivante. »



© INRAE - Bertrand Nicolas

de pâturage dans l'année. La transition vers ce système herbager a été très rapide. « *Les éleveurs ont immédiatement réimplanté des prairies en misant sur la diversification des espèces végétales (parfois jusqu'à dix espèces avec des cycles de végétation décalés) pour faire face aux épisodes récurrents de sécheresse. Avec une bonne gestion de ces prairies et du pâturage<sup>1</sup>, les éleveurs ont réduit leurs charges : moins de culture de maïs, moins d'achats d'engrais et d'aliments concentrés. Ces économies leur ont permis d'améliorer leurs résultats économiques dès la première année, avant même d'être labellisés "agriculture biologique" et de bénéficier des prix du lait bio, environ 1,5 fois plus cher que le lait conventionnel à l'époque* », analyse Guillaume Martin, agronome à INRAE, qui a suivi avec son équipe 19 éleveurs laitiers pendant trois ans. Les enquêtes montrent par ailleurs que la satisfaction des éleveurs s'est améliorée avec la conversion au bio, en particulier sur les aspects de rentabilité économique et de liens sociaux.

Cette conversion présente également d'importants avantages au regard de l'atténuation et de l'adaptation au changement climatique. Elle permet d'être plus autonome pour nourrir les animaux et de bénéficier des avantages des prairies en termes de stockage de carbone, de lutte contre

↑  
Parcelle en  
agroforesterie,  
associant de  
la vigne et une  
plantation de  
pins.

l'érosion, de biodiversité et d'enrichissement du sol en matière organique, ce qui améliore aussi la rétention d'eau. De plus, l'herbe fraîche couvre 90 % des besoins en eau des vaches.

#### La transition peut impliquer toute une filière

Les transitions sont forcément plus longues pour les cultures pérennes (vignes, arbres fruitiers) où les choix stratégiques portent sur 15 à 30 ans. Dans le cas de la vigne, par exemple, c'est toute la filière française qui s'est mobilisée pour s'adapter au changement climatique et contribuer à son atténuation. Première filière à avoir mené à bien sa réflexion dans ce domaine, elle a présenté sa stratégie aux pouvoirs publics en 2021. Celle-ci s'appuie sur les résultats du projet LACCAVE →

**Certains exemples  
montrent que la  
transition vers  
l'agroécologie  
peut être rapide.**

(2012-2021), une initiative d'INRAE impliquant 25 équipes de recherche et 12 organismes partenaires. Plusieurs leviers peuvent être mobilisés conjointement pour s'adapter au déficit hydrique qui affecte les vignobles du sud de la France, provoquant des baisses de rendement et altérant la qualité du raisin et du vin : choix de cépages et porte-greffes plus tolérants à la sécheresse, relocalisation des vignes sur des sols plus profonds, plus ombragés ou en altitude, changements dans les pratiques viticoles (taille, effeuillage, enherbement maîtrisé, paillage au sol, amendements organiques, haies), introduction éventuelle d'irrigation au goutte-à-goutte en association avec des pratiques agroécologiques, adaptation de la vinification pour réduire la teneur en alcool, etc.

### La viticulture pionnière

L'adaptation est déjà en cours : « *Dans le Bordelais, des viticulteurs testent des cépages "extérieurs" pour répondre au changement climatique, tout en s'assurant qu'ils sont conformes à la typicité des vins de Bordeaux. Depuis 2018, les cahiers des charges des appellations autorisent l'introduction de tels cépages. À INRAE, nous étudions 52 cépages différents provenant du sud et de l'ouest de l'Europe pour voir comment ils pourraient répondre à la production de vin de Bordeaux demain* », précise Nathalie Ollat, copilote du projet LAC-CAVE avec Jean-Marc Touzard, économiste à INRAE. Pour ce dernier, tout dépend du niveau du réchauffement climatique. Les leviers étudiés peuvent être combinés pour s'adapter au réchauffement si l'on reste en deçà de +2°C en 2100. « *Mais plus on dépasse ce seuil, moins la viticulture de terroir que l'on connaît sera possible : à cause du réchauffement et surtout des aléas climatiques, il sera de plus en plus difficile de produire durablement des vins de qualité dans des terroirs définis. La production plus aléatoire de raisin sera vendue à des vinificateurs-négociants qui pourront assembler et corriger le vin par la chimie, ou même vinifier toute l'année des moûts issus de différentes régions. Si l'on aime le vin et ses terroirs, il faut tout faire pour mettre en œuvre les objectifs de la COP21.* » ●

1. Choix des espèces pour obtenir des prairies pérennes et une pousse de l'herbe régulière, date de mise à l'herbe opportune pour « nettoyer » les pâtures

avant l'herbe du printemps, chargement en animaux et temps de pâturage adaptés pour favoriser la productivité et la qualité des repousses suivantes.

### À SAVOIR

## Les principaux leviers de l'agroécologie

#### DIVERSIFICATION DES VARIÉTÉS ET DES CULTURES :

[et des espèces et races d'animaux] pour réduire la vulnérabilité et favoriser la résilience : utiliser plusieurs variétés et espèces cultivées, seules ou en mélange ; allonger les rotations ; introduire des légumineuses qui apportent de l'azote au sol ; introduire des plantes de service, cultivées en association avec les cultures de rente ou en intercultures pour leurs effets bénéfiques [lutte contre les bioagresseurs, les adventices, amélioration des propriétés du sol].

#### BIOCONTRÔLE :

protéger les cultures avec des ennemis naturels des ravageurs, des biopesticides d'origine végétale, des phéromones, plutôt qu'avec des pesticides de synthèse.

#### COMPLÉMENTARITÉ ANIMAL-VÉGÉTAL :

associer culture et élevage pour apporter de la matière organique au sol et pour valoriser les surfaces en herbe et les sous-produits des cultures en tant qu'aliments pour les animaux [pailles, tourteaux].

#### PRÉSERVATION DES SOLS :

couvrir les sols pour les protéger contre l'érosion, pour stocker du carbone, augmenter la réserve utile en eau et apporter de la matière organique.

#### MISE EN PLACE D'INFRASTRUCTURES AGROÉCOLOGIQUES :

haies, bandes enherbées, fossés, mares, pour favoriser la biodiversité [y compris les auxiliaires des cultures], la qualité de l'eau et limiter le ruissellement.

#### AGROFORESTERIE :

introduire des arbres pour favoriser la biodiversité, la qualité du sol et de l'eau, apporter ombre et protection aux animaux et aux cultures.



## INTERNATIONAL La coopération pour accélérer la transition

Les problématiques de l'eau, du changement climatique et de la transition agroécologique doivent s'envisager au niveau mondial. INRAE coordonne et s'engage dans de nombreux projets internationaux.

INRAE est moteur de l'initiative de programmation européenne JPI Water, lancée en 2011, qui vise à coordonner les travaux de recherche des 25 États membres sur la gestion de l'eau. INRAE fait également partie du réseau REECAP<sup>1</sup>, dont l'objectif est de promouvoir l'utilisation d'approches expérimentales et comportementales pour l'évaluation de la Politique agricole commune [PAC]. « Nous développons des outils et produisons des données afin de guider les décideurs politiques et d'accroître l'adhésion des agriculteurs », témoigne Sophie Thoyer, cheffe adjointe du département ÉcoSocio à INRAE.

La démarche fait des adeptes puisque REECAP a reçu en janvier 2022 le prix américain CBEAR<sup>2</sup> qui récompense l'innovation agro-

environnementale. Au niveau mondial, « le manque de résilience du secteur agricole, ainsi que la pauvreté et les inégalités généralisées dans les nations en développement, plus particulièrement en Asie et en Afrique, exacerberont les impacts du changement climatique et entraîneront des effets en cascade au-delà des frontières. Il est donc dans l'intérêt des nations riches de financer l'adaptation au changement climatique des régions les plus à risque », indique l'institut politique Chatham House dans son rapport d'octobre 2021<sup>3</sup>.

Depuis 2011, INRAE a par exemple développé un programme de recherche avec l'Inde, un pays impacté, comme toutes les zones semi-arides, plus fortement et plus tôt par le changement climatique. « Cette collaboration a été saluée par le Sénat comme un "partenariat exemplaire". Grâce à l'économie expérimentale et à la modélisation, nous recherchons avec nos homologues indiens des stratégies d'adaptation objectivées par des résultats chiffrés et basés sur des travaux de terrain. Notre mission en France et à l'international, face à cet enjeu environnemental majeur, est d'accompagner la transformation par la recherche et l'appui aux politiques publiques sur de nouvelles orientations plus durables », conclut Alban Thomas, directeur scientifique adjoint Environnement d'INRAE.

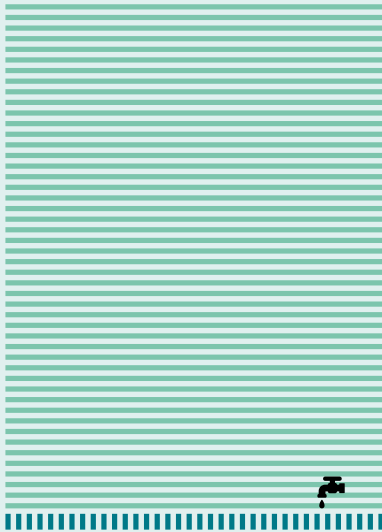
1. [url.inrae.fr/3MW06Ft](http://url.inrae.fr/3MW06Ft)

2. The Center for Behavioral & Experimental Agri-Environmental Research

3. What near-term climate impacts should worry us most? Quiggin et al., oct 2021, Environment and Society Programme.

# L'IRRIGATION EN FRANCE

## FRANCE MÉTROPOLITAINE



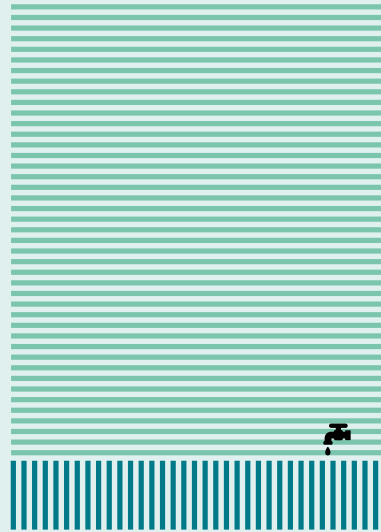
**5%**  
de la superficie agricole utilisée (SAU) irriguée en 2016



1 agriculteur sur 6 utilise l'irrigation

**Provenance de l'eau irriguée**  
Rivières et cours d'eau (Sud), nappes souterraines (région Centre, Beauce), retenues d'eau (Sud-Ouest).

## DÉPARTEMENTS D'OUTRE-MER



**15%**  
de la superficie agricole utilisée (SAU) irriguée en 2016

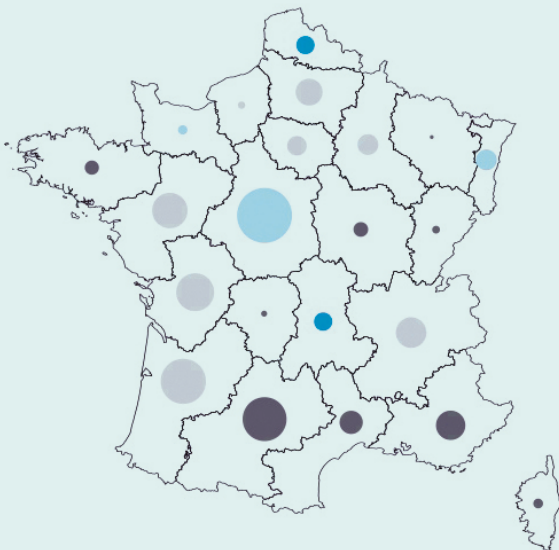


1 agriculteur sur 5 utilise l'irrigation

**Principales cultures irriguées**  
Canne à sucre, banane, agrumes et légumes frais.

## ÉVOLUTION DES SURFACES IRRIGABLES EN FRANCE ENTRE 2000 ET 2010

(irrigables = équipées pour l'irrigation)



**Évolution par rapport à 2000**  
● Augmentation entre + 5 et + 10 %  
● Stable entre - 5 et + 5 %  
● Baisse de - 5 à - 15 %  
● Baisse > - 15 %

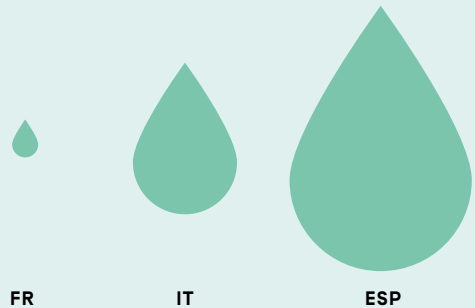
**Surfaces irrigables en 2010**  
en milliers d'hectares



Diminution des surfaces irrigables de 12 % entre 2000 et 2010, après un triplement entre 1970 et 2000. En 20 ans, l'efficacité de l'irrigation (tonne de matière sèche produite par m<sup>3</sup> d'eau) a augmenté de 30 %. Stabilité des surfaces irrigables pour la

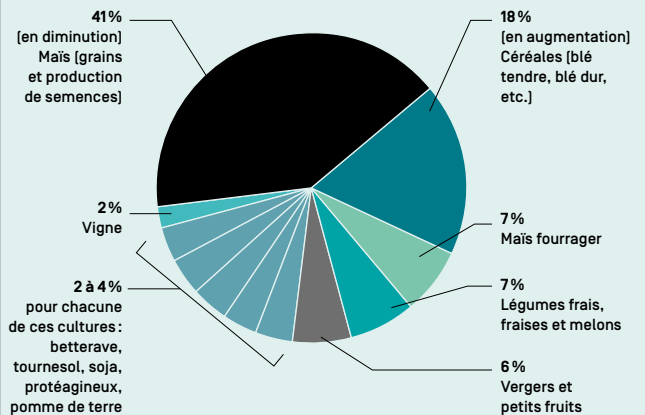
région Centre-Val de Loire, principale région irrigante. Diminution de l'irrigation dans le Sud et augmentation en Auvergne, Nord Pas-de-Calais (entre 2000 et 2010). Le Sud-Est représentait 50 % de la surface irriguée en 1970, 18 % en 2010.

## VOLUME D'EAU UTILISÉ POUR L'IRRIGATION



## PRINCIPALES CULTURES IRRIGUÉES EN FRANCE

en % de la surface totale irriguée



source : SSP- Agreste 2010

# IRRIGUER DIFFÉREMMENT

Avec le réchauffement climatique, la demande en eau pour l'irrigation augmente, y compris dans les pays tempérés, dont les cultures utilisent surtout de l'eau de pluie. Pour économiser l'eau, il existe des solutions pour adapter l'agriculture pluviale, avant de recourir à l'irrigation, qu'il faut optimiser par ailleurs.

## Tour d'horizon.

Quand on parle d'agriculture en France, on parle essentiellement d'agriculture « pluviale » : la plupart de nos cultures sont en effet arrosées naturellement, par l'eau de pluie. Ce n'est pas le cas pour d'autres régions de la planète, puisque l'agriculture irriguée produit plus de 40 % de l'alimentation mondiale sur moins de 20 % des terres. Cependant, avec le réchauffement climatique, la demande en eau pour l'irrigation augmente, y compris dans les pays tempérés.

### Adapter l'agriculture pluviale au manque d'eau

« Au sud de la Méditerranée, dont le climat commence à se retrouver au sud de la France, on a longtemps observé une situation duale où les efforts étaient concentrés sur une agriculture irriguée très intensive et très productive, alors que l'agriculture pluviale, qui occupe la plus grande partie du territoire, était moins soutenue et moins valorisée, analyse Sami Bouarfa, spécialiste de l'irrigation à INRAE. Pour éviter cette focalisation sur l'irrigation, il faudrait inverser les priorités, c'est-à-dire commencer par adapter l'agriculture pluviale à la sécheresse et ne considérer l'irrigation qu'en dernier recours. » Les leviers d'adaptation de l'agriculture

**Phénotypage**  
Observation des caractéristiques visibles de la plante, résultant de l'expression de son génome.

pluviale au manque d'eau sont nombreux, à commencer, selon les principes de l'agroécologie, par la diversification des rotations en incluant plus de cultures d'hiver et des espèces plus tolérantes à la sécheresse : blé dur, tournesol, sorgho, colza, légumineuses comme le pois, le pois chiche, le soja, voire des espèces de zones arides comme le niébé, le quinoa ou le sarrasin. INRAE conduit des travaux pour valoriser certaines de ces espèces, par exemple en sélectionnant des variétés de pois résistantes à des pathogènes ou en élaborant des modèles de prévision du rendement du tournesol. En mobilisant notamment les outils du phénotypage à haut débit, l'Institut travaille aussi à la sélection de variétés de maïs, blé et pois tolérantes à la sécheresse. Dans le Sud-Ouest, un mouvement s'amorce dans le sens de la diversification et on observe ces dernières années une diminution des surfaces irriguées de maïs pour la production de grains, et, dans une moindre mesure, de maïs pour la production de semences, qui sont des cultures à forte valeur ajoutée mais très consommatrices d'eau en été, la période la plus critique pour la ressource en eau. →

L'introduction de nouvelles cultures doit s'accompagner du développement des filières correspondantes (collecte, transformation, commercialisation...), un processus long et complexe qui nécessite le soutien des régions et de l'État, au travers de dispositifs tels que les territoires d'innovation, les pôles de compétitivité ou les plans alimentaires territoriaux (PAT), comme c'est le cas par exemple pour la filière des protéagineux avec le Plan national protéines végétales du Gouvernement, ou encore pour le Territoire d'innovation porté par la métropole dijonnaise « Dijon alimentation durable 2030 »<sup>1</sup>. Ainsi, comme le souligne le rapport de la mission interministérielle CGEDD-CGAAER de 2020<sup>2</sup>: « Face au changement climatique, dans de nombreux cas, le progrès de l'agriculture pluviale sera encore plus décisif que celui des cultures irriguées. »

#### Irrigation et agroécologie

Du fait de son utilisation possible pour maximiser les rendements, l'irrigation est souvent associée en France à l'agriculture intensive, particulièrement dans le cas de la maïsiculture. « *Pourtant, des chercheurs ont documenté dans certaines régions du sud de la Méditerranée des pratiques agroécologiques en systèmes irrigués. De plus, l'irrigation peut être un levier pour la diversification des cultures, qui est l'un des piliers de l'agroécologie* », souligne Delphine Leenhardt, agronome à INRAE. La chercheuse monte actuellement un projet en Occitanie pour mieux connaître les consommations d'eau et les pratiques de gestion de l'eau dans les systèmes agroécologiques et comprendre comment les structures de vente associées s'engagent sur la question de l'eau, notamment au travers de leurs chartes. Il s'agira aussi d'identifier les facteurs socio-économiques favorables à une agriculture irriguée

## L'irrigation peut être un levier pour la diversification des cultures, qui est l'un des piliers de l'agroécologie.

1. Voir *Ressource n°1*, page 29, [inrae.fr/ressources](http://inrae.fr/ressources)

2. [cgedd.documentation.developpement-durable.gouv.fr/notice?id=Affaires-0011497](http://cgedd.documentation.developpement-durable.gouv.fr/notice?id=Affaires-0011497)

3. [hal.inrae.fr/hal-02608073](http://hal.inrae.fr/hal-02608073)

4. Expertise scientifique collective sur l'impact cumulé des retenues. Rapport de synthèse. [url.inrae.fr/30P2yry](http://url.inrae.fr/30P2yry)

5. Eutrophisation : processus d'accumulation de nutriments (azote et phosphore essentiellement) dans les milieux aquatiques, pouvant provoquer un développement excessif d'algues.

agroécologique et d'accompagner l'ensemble des irrigants vers ces pratiques.

#### Vers une irrigation de résilience

Dans la même mouvance, « l'irrigation de résilience » est définie comme une irrigation de sécurité, à la différence d'une irrigation qui vise à maximiser les rendements et qui entraîne une consommation importante en eau et en intrants. En effet, le rendement étant lié à la quantité d'eau fournie à la plante, on peut augmenter l'irrigation dans le but de maximiser le rendement. C'est souvent le cas en grandes cultures, pour lesquelles l'irrigation n'est en général pas indispensable, au contraire des cultures fruitières et maraîchères, plus dépendantes de l'eau. S'orienter vers une irrigation de résilience, c'est chercher à stabiliser les rendements plutôt qu'à atteindre chaque année des valeurs maximales. « *Dans un contexte où l'eau risque d'être rationnée, il est important d'aller vers une vision de l'irrigation moins maximaliste* », souligne Sami Bouarfa.

#### Augmenter l'efficacité de l'irrigation

Les marges d'économie d'eau existent bien à l'échelle de la parcelle. En effet, environ 80 % des irrigants utilisent l'aspersion, parfois avec un matériel ancien, alors qu'il existe des systèmes plus économes en eau : matériel équipé de contrôleurs électroniques ou systèmes localisés (micro-aspersion, goutte-à-goutte de surface ou enterré). Il existe aussi des possibilités d'économie en pilotant l'irrigation à l'aide d'outils d'aide à la décision qui permettent d'apporter la bonne quantité d'eau au bon moment. Ces outils sont basés sur des mesures d'état hydrique des plantes et des sols, le plus souvent *via* des capteurs au sol, mais aussi en faisant appel aux outils de la télédétection.

#### Des outils pour estimer les économies potentielles

L'Union européenne propose des aides pour encourager les économies d'eau, à condition de déclarer une économie à venir de 5 à 25 % (selon les régions) sans diminuer le rendement des cultures. Il est dès lors important pour l'agriculteur d'estimer *a priori* les économies d'eau qu'il va réaliser en améliorant le matériel ou le pilotage de l'irrigation, ce qui n'est pas chose facile car tout dépend de l'état du matériel existant, du sol,



du climat et du type de culture. C'est pourquoi, à la demande du ministère en charge de l'Agriculture, les scientifiques d'INRAE ont établi un référentiel pour évaluer les économies d'eau potentielles en compilant de nombreuses données, région par région, situation par situation<sup>3</sup>. Cet outil est maintenant utilisé pour instruire les demandes de subvention. Les économies d'eau varient de 15 à 25% en améliorant le matériel, et de 10 à 40% en améliorant le pilotage de l'irrigation. L'amélioration du pilotage présente l'avantage d'être moins tributaire des conditions climatiques alors que le passage au goutte-à-goutte se révèle peu efficace en termes d'économie d'eau lors des années très sèches.

Par ailleurs, INRAE a développé un logiciel, **OPTIRRIG**, qui permet de gérer l'irrigation sur plusieurs cultures au sein d'une exploitation, en établissant des scénarios pour savoir quelle culture irriguer, quand et comment.

#### Les retenues d'eau, corollaires de l'irrigation

En France, en dehors des grands barrages qui servent également d'autres usages (production d'électricité, d'eau potable), beaucoup de retenues sont utilisées essentiellement pour l'irrigation. Si

**40 %**  
de l'alimentation  
mondiale est  
produite en  
irrigation sur  
moins de 20 %  
des terres

#### ÉCONOMIES D'EAU POSSIBLES

**15-25 %**  
en améliorant  
le matériel

**10-40 %**  
en améliorant  
le pilotage de  
l'irrigation

le principe est simple – créer des réservoirs d'eau – il existe de nombreuses manières de le faire. Une expertise scientifique collective<sup>4</sup>, conduite par INRAE en lien avec l'Office français de la biodiversité (OFB) en 2016, a ainsi permis d'identifier 23 types de retenues, selon leurs modes d'alimentation en eau et de restitution au milieu. L'expertise décrit aussi les principaux impacts d'une retenue sur le milieu aquatique : diminution du débit en aval, blocage des sédiments grossiers dans la retenue et modification du lit du cours d'eau aval, risque accru d'eutrophisation<sup>5</sup>, évolution des espèces aquatiques. L'évaluation de l'impact cumulé de ces retenues, obligatoire depuis la réforme des études d'impact (2011) pour les retenues soumises à autorisation, reste un sujet de recherche : en effet, cet impact cumulé ne se limite pas à la somme des impacts isolés. L'OFB, avec l'appui de chercheurs d'INRAE, développe actuellement une démarche d'évaluation de ces impacts cumulés sur 8 bassins versants aux caractéristiques contrastées.

#### Stockage intersaisonnier

Actuellement, les regards se portent plus particulièrement sur les retenues dites « de substitu- →

tion», remplies en hiver par des dérivations créées sur des cours d'eau ou par pompage dans les rivières ou dans les nappes. L'eau stockée en hiver est utilisée en été, ce qui permet d'éviter de prélever de l'eau dans le milieu aquatique en période estivale. Ces retenues sont ainsi destinées à sécuriser les usages existants, sans en créer de nouveaux. « Ces retenues ont a priori un impact moindre sur le milieu. Cependant, même si le remplissage de ces retenues se fait en période de "hautes eaux", il faut s'assurer qu'il n'altère pas le bon fonctionnement global du cours d'eau. C'est pourquoi il existe des seuils empiriques de débit ou de hauteur de nappe dans certaines régions pour encadrer le remplissage de ces retenues. Un projet impliquant INRAE débute pour asseoir ces seuils sur des bases scientifiques », indique Nadia Carluier, qui a coordonné l'expertise scientifique collective de 2016. Dans le bassin du Midour (Gers, Landes), certaines retenues peinent déjà à se remplir en hiver. « Dans tous les cas, l'équipement en retenues doit être raisonné au cas par cas selon les territoires, en fonction des enjeux qui y sont collectivement identifiés. Il faut par ailleurs éviter l'effet "rebond", qui fait que l'accès sécurisé à une ressource en eau accroît l'utilisation d'eau et la dépendance des systèmes », conclut Nadia Carluier.

### La conciliation avant tout

Tout comme l'irrigation, les retenues d'eau sont associées à une image d'agriculture intensive et souvent contestées socialement. C'est pourquoi il est important d'intégrer leur gestion dans des projets de territoires élaborés collectivement comme les PTGE (voir p. 22). Dans les Deux-Sèvres par exemple, un projet de construction de douze retenues de substitution a fait l'objet d'un accord entre les acteurs associatifs et les irrigants, qui ont pris des engagements précis et chiffrés sur des pratiques agroécologiques telles que le développement de l'agriculture biologique, la réduction de l'usage d'intrants et le développement des haies. De tels contrats sont de nature à concilier les enjeux écologiques, économiques et sociétaux au sein des territoires pour un partage optimal des ressources en eau. ●

### PERSPECTIVE

## Réutiliser les eaux usées

**Réutiliser les eaux usées traitées pour l'irrigation permet de les valoriser, particulièrement en zone côtière où elles seraient sans cela directement rejetées à la mer.**

Les Assises de l'eau de 2019 ont fixé un objectif de triplement de la réutilisation des eaux usées en France à l'horizon 2025. Dans l'Hexagone, le taux de réutilisation des eaux usées est inférieur à 0,6 %, alors qu'il est de 2,4 % en moyenne en Europe du Nord et beaucoup plus élevé dans les pays méditerranéens : 90, 85 et 60 %, respectivement. L'amélioration des procédés de traitements des eaux usées en amont de la réutilisation agricole doit garantir l'innocuité vis-à-vis des risques de contamination (microbiologique ou chimique). Différentes solutions sont à l'étude à INRAE.

Par exemple, dans son unité expérimentale de Pech Rouge, près de Gruissan (Aude), INRAE expérimente l'irrigation de la vigne avec les eaux sortant de la station d'épuration de Narbonne-Plage. Ces eaux subissent un traitement supplémentaire pour éliminer les microorganismes et sont contrôlées par l'Agence régionale de santé, qui vérifie également que les molécules à risques (médicaments, biocides, etc.) ne dépassent pas le seuil autorisé dans l'eau potable. Ainsi tracées et sécurisées sur le plan sanitaire, ces eaux ont l'avantage d'apporter à la vigne des nutriments (azote, phosphore et potassium), ce qui limite l'usage d'engrais de synthèse.

Le procédé est coûteux, notamment en énergie, et il est plutôt réservé à des zones péri-urbaines, proches des stations d'épuration, et à des zones côtières, car ailleurs, les rejets de stations d'épuration font partie du soutien au débit des cours d'eau et ne peuvent pas être « détournés » sans autorisation.

# AIDER LES AGRICULTEURS À S'ADAPTER

Face au changement climatique, c'est une véritable transformation de l'agriculture qui doit s'opérer, avec de vrais risques pour les agriculteurs au niveau individuel. Un défi qui nécessite des politiques publiques adaptées et performantes.

Les mesures réglementaires et économiques mises en place pour amener les agriculteurs à une gestion plus durable de l'eau sont d'efficacité variable. C'est pourquoi la recherche se mobilise pour trouver des leviers plus efficaces. L'économie comportementale et la modélisation sont ainsi des axes majeurs pour concevoir des systèmes cohérents, adaptés et efficaces pour faciliter et accélérer la transition attendue.

« Pour les agriculteurs, le changement climatique, c'est la double peine, explique Sophie Thoyer, cheffe adjointe du département ÉcoSocio à INRAE. Avec des sécheresses dont la fréquence et l'intensité augmentent un peu plus chaque année, non seulement les ressources en eau diminuent, mais la demande en eau des plantes augmente dans le même temps, le plus souvent en période estivale. » Nous devons aller vers un nouveau modèle agricole plus économe en eau, inspiré de l'agroécologie. En attendant, une irrigation de soutien efficace et maîtrisée doit être mise en place, tout en préservant la ressource aussi bien quantitativement que qualitativement (voir p. 35).

Alors, comment mettre en œuvre cette transformation et l'accompagner? La ressource étant considérée comme un patrimoine national<sup>1</sup>, la question devient étatique, elle est donc régie par

1. Article L 120-1 du code de l'environnement français: « L'eau fait partie du patrimoine commun de la nation ».

2. PTGE: Projet de territoire pour la gestion quantitative de l'eau; SDAGE: Schéma directeur d'aménagement et de gestion des eaux; SAGE: Schéma d'aménagement et de gestion des eaux, à un niveau plus local que le SDAGE.

des lois. La réglementation française sur l'eau s'appuie sur des lois encadrées par une directive-cadre européenne (voir p. 43).

## Des lois pour fixer un cadre et un cap aux agriculteurs

L'objectif de cette politique est de préserver et garantir le « bon état des eaux ». Depuis 1992, l'État délègue la gestion de l'eau aux acteurs locaux, qui, au travers des PTGE, SDAGE et SAGE<sup>2</sup> décident de leurs usages, qu'ils soient agricole, industriel, particulier, touristique ou même environnemental.

Les lois se traduisent par des leviers réglementaires, comme les arrêtés préfectoraux qui imposent des restrictions d'usage de l'eau. Sur chaque bassin versant, l'Organisme unique de gestion collective (OUGC), en collaboration avec le gestionnaire du réseau d'eau, partage un volume prélevable entre les agriculteurs. Au-delà de 1 000 m<sup>3</sup>/an, les irrigants doivent déclarer leurs prélèvements et s'équiper de compteurs que relève le gestionnaire pour facturer l'eau réellement prélevée dans la rivière ou par forage.

Si, la plupart du temps, les réglementations sont suivies, elles sont néanmoins nombreuses, complexes et parfois contradictoires. « Nous nous →

## « La modélisation jouera certainement un rôle d'accélérateur et de catalyseur de cette transformation. »

Stéphane Couture

*retrouvons parfois dans des imbroglis de textes juridiques. Certains, vieux de 150 ans, font le grand écart avec les derniers»,* témoigne Pascal Chisne, responsable du pôle Gestion des eaux à la Compagnie d'aménagement des Côteaux de Gascogne (CACG).

### Des leviers économiques pas toujours efficaces

Les leviers économiques dits « incitatifs », mais à caractère obligatoire, ont pour objectif de faire prendre conscience de la rareté de la ressource afin d'inciter à l'économiser et à la préserver des pollutions. Les agriculteurs payent notamment aux Agences de l'eau les redevances « prélèvement » et « pollution » qui servent à financer des projets pour la préservation des milieux aquatiques. En réalité, ces taxes n'incitent guère à l'économie d'eau, car leur montant est trop faible. En revanche, « *le prix de l'eau, fixé par les gestionnaires de réseaux collectifs de distribution, pourrait devenir un bon levier de changement. Aujourd'hui, il est inadapté, car la grande majorité des agriculteurs payent encore au forfait. Les gros consommateurs ne sont donc pas pénalisés. De plus, ce système de calcul ne contribue pas (ou pas suffisamment) aux coûts de fonctionnement des installations* », pense Daniel Lepercq, chargé de mission à la CACG. Pour répondre à ces deux problématiques, certains gestionnaires, comme la CACG notamment, ont mis en place un système tarifaire avec une part fixe, calculée sur une surface ou un volume souscrit, et une part variable, calculée sur le volume réellement consommé. Ce mode de tarification, plus incitatif et plus efficace, tend à se développer sur les autres bassins versants.

Le levier volontaire le plus répandu est la subven-

3. Hascic and Wu, 2006. Pollution de l'eau par les agriculteurs. [url.inrae.fr/3JdLe39](http://url.inrae.fr/3JdLe39)

4. Dans le cadre du projet de recherche « Agriculture, environnement, Vittel », 1987-2004. Deffontaines *et al.*, 1993.

tion appelée Mesure agroenvironnementale et climatique (MAEC) de la Politique agricole commune (PAC). Sa portée est cependant limitée car elle est basée sur une obligation de moyens, et non de résultats. Cette subvention est consentie aux agriculteurs qui contribuent à la protection de l'eau et de la biodiversité, au-delà de la réglementation, par exemple en convertissant une partie de leurs surfaces en prairies ou en forêt. En effet, selon une étude publiée en 2013<sup>3</sup>, la conversion de terres agricoles en forêt occasionnerait une baisse de la concentration de nitrates dans l'eau et donc une baisse des coûts de dépollution.

Il existe également les paiements pour services environnementaux (PSE) par des partenaires privés ou publics qui rémunèrent les actions des agriculteurs en vue d'améliorer la qualité de l'eau. Il s'agit ici de « sur mesure ». En France, la première initiative a été lancée par la Société des eaux minérales de Vittel en collaboration avec INRAE<sup>4</sup>. Afin de préserver la qualité de l'eau de source, l'industriel rémunère, *via* la filiale Agrivair, une quarantaine d'agriculteurs qui se sont engagés à réduire les intrants (engrais azotés et pesticides) sur leurs cultures et à réduire leur cheptel de bovins laitiers en adoptant un modèle extensif. Un contrôle régulier a montré une diminution significative de la pollution des eaux.

### L'intérêt des labels

Du côté des consommateurs, les leviers de type labels pourraient être renforcés. « *Le consommateur devient de plus en plus exigeant sur la qualité des produits alimentaires* », explique Nina Graveline, économiste à INRAE. En choisissant des produits labellisés AB<sup>5</sup>, HVE<sup>6</sup>, etc., il rémunère les efforts consentis par le producteur qui adopte des pratiques plus vertueuses. Il devient « consommateur ». Le projet OENOMED porté par INRAE vise à co-construire un label viticole avec des viticulteurs et des gestionnaires des aires protégées. Il reconnaîtrait les efforts des viticulteurs pour la préservation de l'eau, de la biodiversité, des sols, du patrimoine architectural et culturel ainsi que pour le patrimoine viticole et œnologique. « *Le vin s'y prête bien car il est très lié au terroir et peut être valorisé avec le tourisme. En revanche, cette piste "label" se révèle plus difficilement généralisable pour des produits comme les céréales pour des questions*



© INRAE - Bertrand Nicolas

de demande. En effet, un surcoût de prix serait-il tenable pour des aliments de consommation courante comme le pain ou les pâtes ? » s'interroge la chercheuse.

En résumé, tous ces instruments économiques classiques, pris isolément, se révèlent insuffisants pour accompagner la transformation. Pour Nina Graveline, « ce sont des incitations de type carotte et bâton qui découlent de la théorie économique, mais l'agriculteur n'est pas un pur homo economicus ».

Pourquoi les agriculteurs sont-ils indifférents, voire parfois hostiles, aux leviers économiques classiques ? D'après Sophie Thoyer, « l'agriculteur, comme tout un chacun, ne prend pas de décisions fondées exclusivement sur un arbitrage économique entre coûts et bénéfices espérés. Le processus est plus complexe. D'autres paramètres entrent en jeu comme sa sensibilité à l'environnement et au groupe social auquel il appartient ». Afin de mettre en place des politiques publiques plus efficaces, l'économie comportementale s'est donc intéressée aux différents facteurs qui influencent la prise de décision.

#### L'apport de l'économie comportementale

Les scientifiques testent par exemple un outil, le *nudge* (« coup de pouce »), théorisé par le prix

↑  
Agriculteur  
et chercheur sur  
le domaine  
expérimental  
d'Époisse, en  
région Bourgogne  
– Franche-Comté.

Nobel d'économie Richard H. Thaler et couramment utilisé en marketing. Il oriente les individus vers de nouvelles pratiques, grâce à de simples suggestions. INRAE, en partenariat avec la CACG, a testé cet outil sur les compteurs d'eau « intelligents », en jouant sur la norme sociale. Ainsi chaque semaine, l'agriculteur reçoit par SMS le relevé de sa consommation d'eau, mais aussi celui des voisins pour comparaison. Résultat ? Les gros consommateurs d'eau ont effectivement diminué leurs prélèvements... Avec un effet pervers cependant, une augmentation de ceux des petits consommateurs.

« Globalement, même si le *nudge* a un effet limité, le décideur politique gagne toujours à l'associer à un outil économique. Ces coups de pouce continuent à être développés. Pour réussir la transformation agricole, nous →

**Du côté des consommateurs, les leviers de type labels pourraient être renforcés.**



*devons repenser nos stratégies à la lumière de l'économie comportementale pour développer des leviers innovants», conclut Sophie Thoyer.*

#### **Sur la piste de nouveaux leviers**

D'autres pistes sont à l'étude, comme les enchères (ou appels à projets) par une organisation publique ou privée sur un service environnemental rendu par des agriculteurs. Elles présentent un avantage de taille : les exploitants peuvent choisir leur cahier des charges ainsi que le montant du paiement. Les organisations, elles, peuvent choisir le projet qui a le plus grand impact environnemental. En revanche, le dispositif met les agriculteurs en concurrence alors que la tendance des leviers organisationnels comme les SAGE ou les PTGE est plutôt à la coopération.

#### **Privilégier l'obligation de résultats**

Instaurer des subventions et paiements (MAEC, PSE) avec une obligation de résultats plutôt qu'une obligation de moyens serait à encourager

pour une meilleure efficacité, sous réserve de développer des indicateurs pour mesurer ces résultats. C'est le cas de la MAEC « prairies fleuries », favorable à la qualité de l'eau car elle encourage le maintien des prairies. C'est une mesure à obligation de résultats, que l'on évalue par la présence de plantes indicatrices du bon état agroécologique de la prairie.

Les acteurs de l'eau s'emparent progressivement des différents leviers à l'échelle des territoires, grâce à la collaboration, la formation et la communication. Mais devant tous ces outils, comment les décideurs politiques, les gestionnaires et les agriculteurs peuvent-ils trouver les leviers qui répondent au mieux à leurs problématiques territoriales ? « *Les acteurs de la gestion de l'eau, quels qu'ils soient, ont besoin de données objectives pour avancer sereinement. La modélisation est un bon outil pour ça. Elle prend en compte les facteurs psychologiques et cognitifs qui interviennent dans la prise de décision ainsi que les spécificités du territoire identifiées par l'économie expérimentale. Créer des modèles de simulation permet de tester des leviers et de voir s'ils changent ou non les comportements. La modélisation jouera certainement un rôle d'accélérateur et de catalyseur de cette transformation* », explique Stéphane Couture, spécialiste de la modélisation de la ressource en eau à INRAE. ●

5. Label de qualité français créé en 1985, et fondé sur l'interdiction d'utilisation de produits issus de la chimie de synthèse.

6. La Haute Valeur Environnementale (HVE) est le plus haut des

3 niveaux de la certification environnementale des exploitations agricoles. 4 domaines sont concernés : stratégie phytosanitaire, préservation de la biodiversité, gestion des fertilisations et gestion quantitative de l'eau.

CADRE LÉGISLATIF

## Pour un « bon état des eaux »

1964

LOI FRANÇAISE

L'eau se gère par grands bassins versants. Création des Agences de l'eau qui collectent les redevances et financent les projets de préservation et de restauration du bon état de la ressource. Mise en œuvre du principe du « pollueur-payeur ».

1992

LOI FRANÇAISE

Elle prévoit un schéma directeur d'aménagement et de gestion des eaux (SDAGE) sur chacun des 12 grands bassins versants de France métropolitaine et d'outre-mer et leur déclinaison locale au travers des schémas d'aménagement et de gestion des eaux (SAGE).

2000

DIRECTIVE-CADRE

EUROPÉENNE SUR L'EAU (DCE)

Elle fixe 4 objectifs : la non-dégradation des ressources et des milieux, le bon état des masses d'eau, la réduction des pollutions, le respect de normes dans les zones protégées.

2006

LOI FRANÇAISE (LEMA)

La Loi sur l'eau et les milieux aquatiques reprend la DCE et tient compte du changement climatique. Elle refonde les principes de tarification de l'eau.

## ACCORDS

### Les règles de partage de l'eau entre différents pays

Pour mettre au point le partage des eaux, les États signent le plus souvent un accord, le *water sharing agreement* (WSE).

*« Il est basé sur les règles suivantes : chacun peut avoir les bénéfices de l'exploitation de son eau, les lâchers des pays en amont sont compensés par des rétributions monétaires ou énergétiques (pétrole, gaz ou électricité) et les pays ne peuvent pas prélever au-delà de leurs besoins. Les traités signés par le passé ont permis d'anticiper ou de stopper des différends qui auraient pu dégénérer »,* constate Stefan Ambec, économiste à INRAE.

Les conflits armés autour de l'eau ont été l'exception. Mais qu'en

sera-t-il quand la pression pour cette ressource sera plus forte ? Pour faire face à ces risques, les scientifiques travaillent à la modélisation des situations et tentent de trouver des solutions plus durables et acceptables pour tous.

**Les conflits armés autour de l'eau ont été l'exception. Mais qu'en sera-t-il quand la pression pour cette ressource sera plus forte ?**

## CLIMAT

### La gestion du risque et les assurances

Malgré un risque qui augmente avec les aléas climatiques, seulement 30 % des agriculteurs sont assurés pour leurs récoltes. Le Gouvernement a présenté en

janvier 2022 au Parlement son projet de réforme des outils de gestion des risques climatiques en agriculture.

*« Entre le Varenne de l'eau et la nouvelle loi sur l'assurance agricole, le nombre d'assurés augmentera ces prochaines années »,* avance Alban Thomas, directeur scientifique adjoint Environnement d'INRAE.



# Rencontre avec un agriculteur innovant

Entretien avec Laurent Dirat, agriculteur depuis 30 ans sur la commune de Gramont, dans le Tarn-et-Garonne.

Pour son irrigation, Laurent Dirat prélève l'eau de l'Arrats, l'une des 17 rivières qui prennent leur source au pied des Pyrénées et qui forment, avec plusieurs lacs artificiels et un canal, le système hydrographique NESTE.

Sur près d'un demi-siècle, la Compagnie d'aménagement des Coteaux de Gascogne (CACG), qui gère ce bassin versant, a constaté une baisse de 25 % des écoulements naturels, particulièrement marquée pendant les mois d'été. Le territoire est dit sous tension pour la ressource en eau. Comme sur tous les bassins versants, les irrigants doivent demander à l'Organisme unique de gestion collective (OUGC) une autorisation de prélèvement en rivière (ou en forage) et poser un compteur sur chaque pompe installée<sup>1</sup>. Le volume prélevable étant

limité, les nouvelles demandes sont mises en attente le temps qu'un irrigant sorte de la liste.

## Que cultivez-vous ?

Depuis tout petit, je suis passionné par les fruits et légumes exotiques. Je fais pousser des herbes asiatiques, des sortes de moutarde, des concombres vietnamiens, des aubergines africaines, du kiwano... mais aussi des fraises.

Je les cultive sur une quarantaine d'hectares et je consacre les 200 autres hectares au blé et au tournesol, en rotation. Je n'irrigue que mes fruits et légumes. C'est mon assurance récolte, car sur sol sec et chaud, se développe un champignon de faiblesse, *Macrophoma phaseolina*. Il provoque jusqu'à 80 % de mortalité.

## Comment gérez-vous la ressource en eau sur votre exploitation ?

Pour mes plantes maraîchères, j'irrigue au goutte-à-goutte pendant les heures les plus chaudes, entre début juin et mi-juillet. J'ai également remplacé le

glyphosate pour désherber les allées par du binage. Puis je conserve un tapis végétal pour protéger le sol. Avec cette méthode, j'économise de l'eau. Le réchauffement climatique, ça fait 20 ans que nous en voyons les effets sur notre territoire. Personnellement, j'en ai vraiment pris conscience lors de la sécheresse de 2003. J'ai fait construire un petit lac privé de 25 000 m<sup>3</sup>. C'est mon plan B, une sorte d'assurance.

## Les compteurs d'eau permettent-ils une meilleure gestion ?

J'avoue ne pas les avoir vus arriver d'un bon œil. Avec deux compteurs, je ne pouvais arroser qu'à deux endroits de mon exploitation. Impossible dans ces conditions de contrer la maladie. Nous avons donc mutualisé l'outil de travail au travers d'une association syndicale autorisée d'irrigation (ASAI) qui regroupe 44 propriétaires dont 17 irrigants. Nous gérons notre système d'irrigation comme un syndic de copropriétaires. La mutualisation permet de faire baisser nos charges de fonctionnement.

Nous optimisons nous-mêmes l'outil et traquons les fuites. Finalement, je me suis rendu compte que les compteurs ont un effet bénéfique car nous savons ce que nous pouvons prélever par jour. Et c'est aussi plus facile pour la CACG d'anticiper et de gérer l'approvisionnement en amont, d'autant qu'il faut 3 jours pour que l'eau nous parvienne des Pyrénées.

### Comment êtes-vous organisés au niveau du territoire ?

Sur le bassin Adour-Garonne, nous étions les seuls à ne pas avoir de Commission locale de l'eau (CLE). Or, nous sommes sur l'un des territoires où l'on irrigue le plus... Comme le sujet m'intéresse, je représente aujourd'hui les irrigants du Tarn-et-Garonne à la Commission NESTE et à la CLE qui vient d'être créée. À la commission, nous avons dû exceptionnellement baisser le débit d'objectif d'étiage (DOE)<sup>2</sup> à 80 % de sa valeur cet été pour pouvoir nous en sortir. Il faudra créer des réserves sécuritaires pour respecter au mieux le DOE et faire face à de potentielles pollutions dans la rivière. Ce travail collaboratif au sein des deux instances permet aussi de faire tomber des clichés. Par exemple, les écologistes et les riverains nous accusent de prélever toute l'eau des rivières. Or seulement 24 % du volume du système NESTE est utilisé pour l'agriculture. Côté agriculteurs, nous trouvons le DOE trop élevé, mais l'Office français de la biodiversité (OFB) nous a expliqué que le diminuer aurait à long terme un impact important sur la biodiversité. Et ça, je peux l'entendre.

### Quel est, selon vous, le frein majeur pour un changement de modèle agricole ?

Avant, je faisais du blé à forte valeur ajoutée. J'ai abandonné. Non seulement il était rare d'avoir une super récolte, mais il fallait traiter avec beaucoup plus

## « Innover, c'est parfois perdre à court terme pour gagner plus tard »

de produits phytosanitaires. Aujourd'hui, je refais du blé de façon traditionnelle. Je raisonne sur mes charges et je suis content avec ce que j'ai. Certains maïsiculteurs ne sont pas dans cette logique. Ils sont dans l'optimisation maximum des récoltes. Je risque de me mettre à dos du monde, mais je trouve que sur nos côtes plus secs, il est aberrant de cultiver plus de 50 % des cultures en maïs. En revanche, je comprends qu'il soit difficile de changer de modèle. Il faut se remettre en question. C'est sûr, innover, c'est risquer de se planter. Et il n'existe pas vraiment d'assurance qui couvre ce risque. Mais c'est aussi perdre pour gagner plus tard.

### Quel levier serait efficace selon vous ?

Je pense que l'incitation par le marché via des certifications ou des labels obligera tous les agriculteurs à changer leurs usages. La PAC, qui se présente pourtant comme plus verte qu'avant, est bien moins exigeante que ma certification GlobalG.A.P.<sup>3</sup> et ses 490 points de contrôle. Ce n'est pas insurmontable, la preuve ! En revanche, je trouve anormal que, dans toute cette chaîne de certification, la responsabilité ne soit supportée que par les agriculteurs. Pour moi, l'irrigation est également un levier pour un changement de culture. Sur notre territoire, nous pourrions par exemple cultiver plus de légumineuses dont le soja et recréer une rotation. Je crois à des solutions locales, modernes, flexibles et réversibles. En Hollande, les agriculteurs innovants sont encouragés avec des subventions.

Domage que la France n'en fasse pas autant...

### Quels sont vos projets ?

J'ai pris conscience de l'importance du sol. Son potentiel s'est effrité avec nos rotations maïs/blé. Cette année, nous allons planter des féveroles sur 6 hectares, avant les fraises, pour apporter de l'azote, de l'humus et faciliter le travail du sol en juin. Sur les autres parcelles, j'expérimente différentes sortes d'humus. J'aimerais bien être accompagné par des chercheurs sur cette partie. Je voudrais également trouver un système de régulation d'eau pour notre rivière. J'en ai vu un à clapet en Allemagne et en Italie qui permettrait de récupérer en aval le volume non utilisé et supérieur au DOE. Nous pourrions ainsi constituer une réserve de secours. Et s'il faut faire une passe à poissons et impliquer des écologistes, tant mieux ! Je veux redonner vie à la rivière. En remontant son niveau à certains endroits stratégiques, nous pourrions également favoriser des zones humides. Il faudra pour cela chercher des solutions techniques et innovantes. Rien n'est figé, c'est ce que j'aime dans notre métier.

1. Autorisation à demander si le volume d'eau prélevé est supérieur à 1 000 m<sup>3</sup>/an. En dessous, le prélèvement est considéré comme « usage divers ».

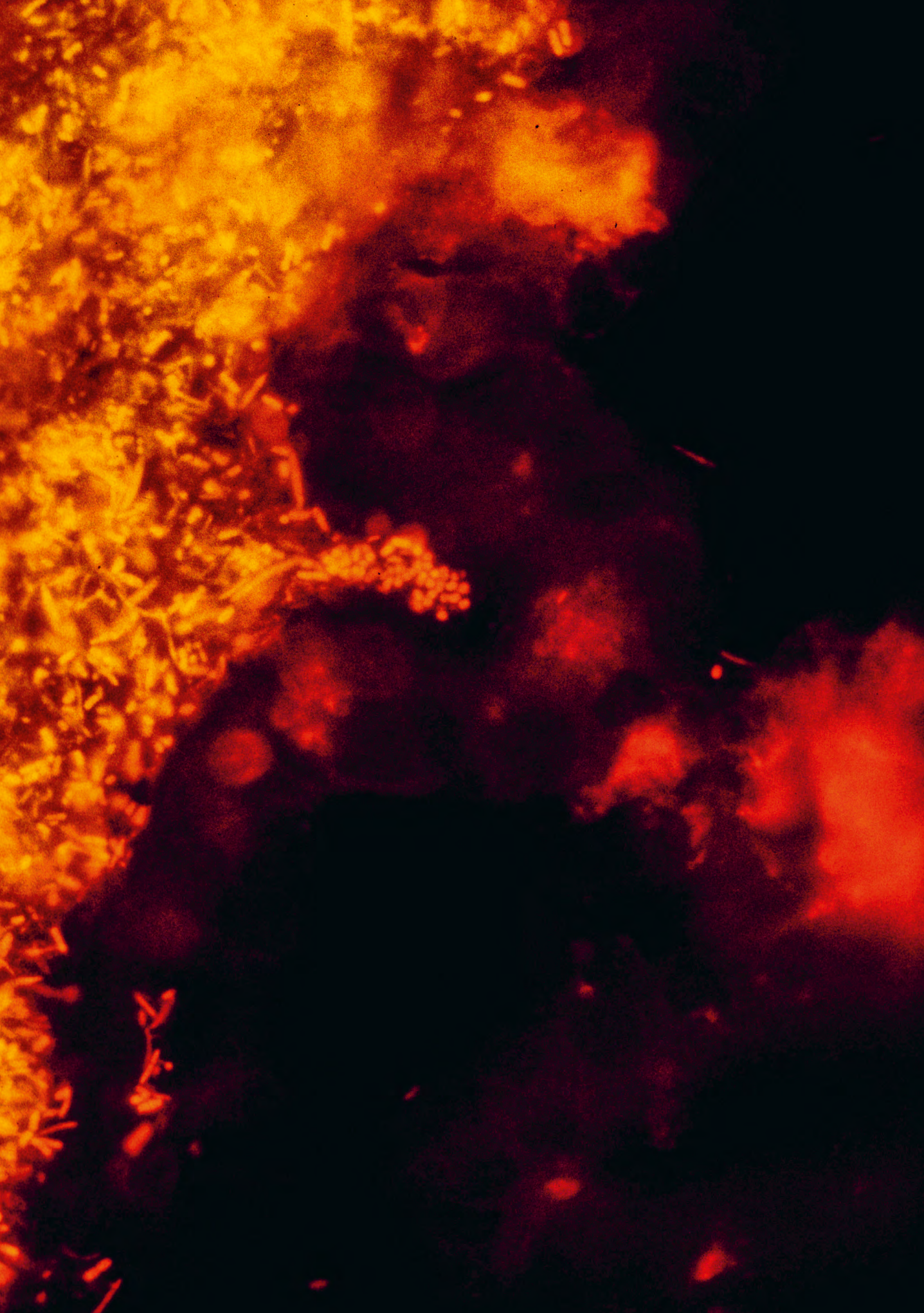
2. DOE : valeur minimale de débit, fixée par le SDAGE, à maintenir pour

assurer la coexistence de tous les usages et le bon fonctionnement du milieu aquatique.

3. G.A.P. : Référentiel sur les bonnes pratiques agricoles rédigé pour la filière fruits et légumes à l'initiative de la grande distribution d'Europe du Nord en 1997.

# LE MICROBIOTE INTESTINAL NOTRE NOUVEL ALLIÉ SANTÉ

Notre corps abrite des écosystèmes riches de milliards de microorganismes, les microbiotes. Étudié initialement dans le rumen des bovins, le microbiote intestinal est apparu au gré des découvertes depuis une quarantaine d'années comme un élément déterminant de la santé humaine, provoquant une petite révolution dans notre approche de la médecine. Voyage au cœur de nos recherches pour découvrir notre nouvel allié santé.



# Le monde caché du microbiote intestinal

Le microbiote intestinal est l'ensemble des microorganismes qui vivent dans notre tube digestif. Il est propre à chaque individu.



## UNE VIE EN SYMBIOSE

Entre l'hôte (nous) et son microbiote, il existe une relation forte, d'interdépendance. Nous le nourrissons via l'alimentation et nous lui offrons un espace de vie, notre intestin. En retour, le microbiote nous rend de nombreux services.

### 1 IL PRODUIT DES VITAMINES

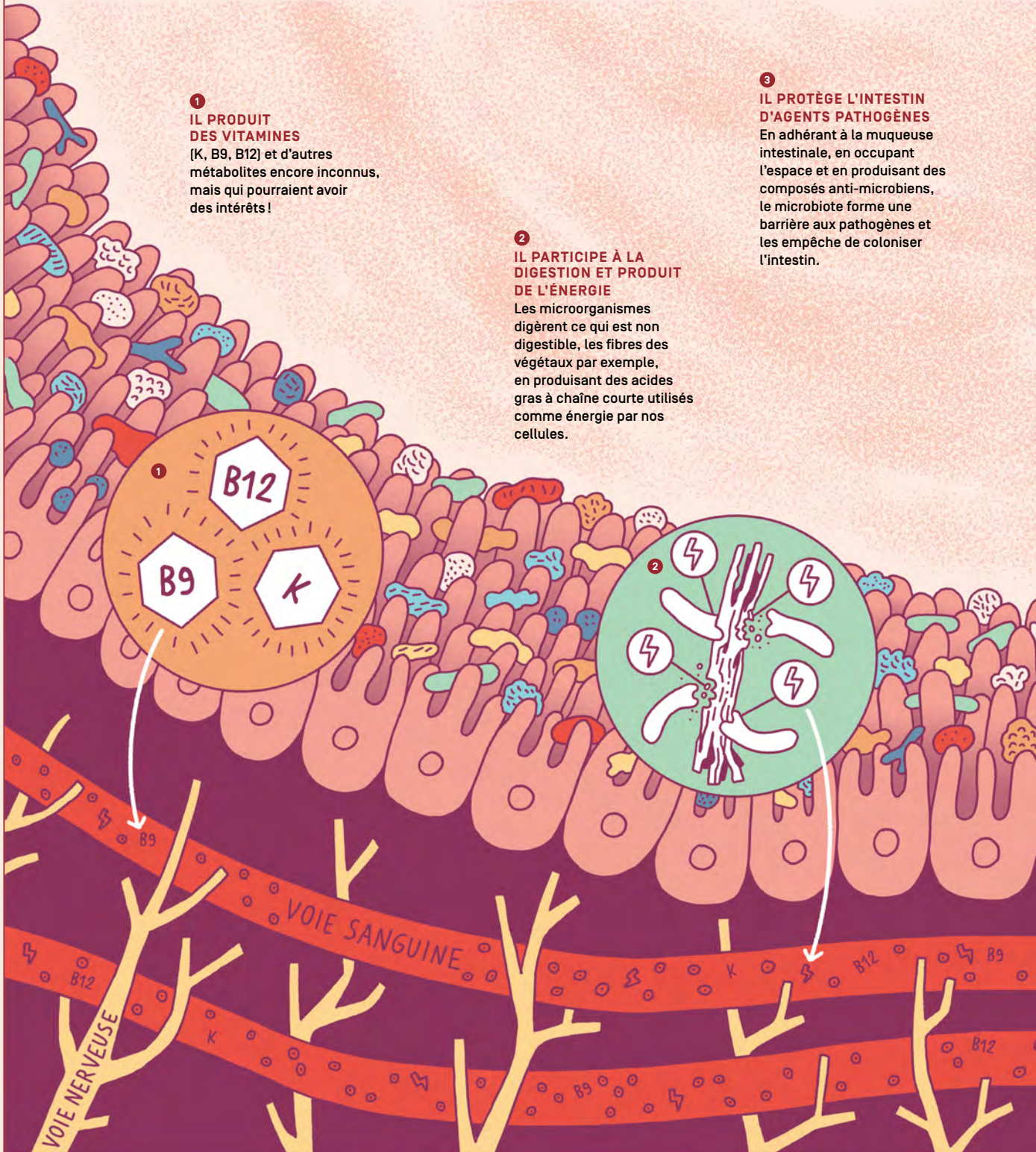
[K, B9, B12] et d'autres métabolites encore inconnus, mais qui pourraient avoir des intérêts!

### 2 IL PARTICIPE À LA DIGESTION ET PRODUIT DE L'ÉNERGIE

Les microorganismes digèrent ce qui est non digestible, les fibres des végétaux par exemple, en produisant des acides gras à chaîne courte utilisés comme énergie par nos cellules.

### 3 IL PROTÈGE L'INTESTIN D'AGENTS PATHOGÈNES

En adhérant à la muqueuse intestinale, en occupant l'espace et en produisant des composés anti-microbiens, le microbiote forme une barrière aux pathogènes et les empêche de coloniser l'intestin.



**50 000**

milliards de micro-organismes pour chaque être humain, autant que de cellules humaines

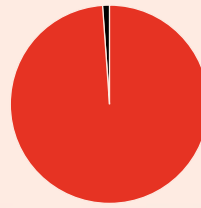
**300**

espèces microbiennes différentes chez un individu sain

**1kg**

de bactéries (99%), archées, champignons, levures, virus

**COMPOSITION DU MICROBIOTE**

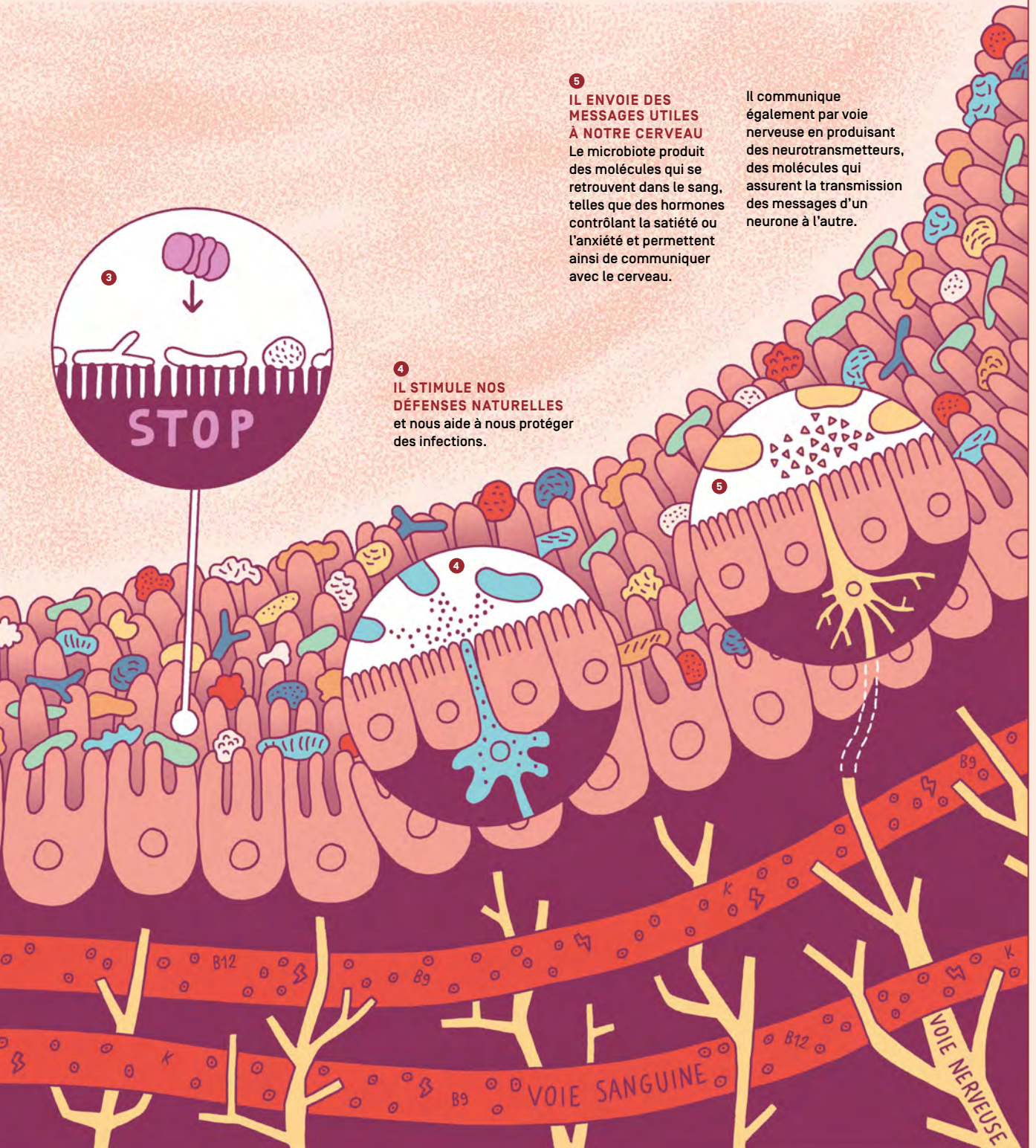


● 99% bactéries et phages [virus bactériens]

● 1% archées, champignons, levures, virus

**600 000**

gènes microbiens... 25 fois plus que de gènes humains



3

**STOP**

4

**IL STIMULE NOS DÉFENSES NATURELLES** et nous aide à nous protéger des infections.

5

**IL ENVOIE DES MESSAGES UTILES À NOTRE CERVEAU**

Le microbiote produit des molécules qui se retrouvent dans le sang, telles que des hormones contrôlant la satiété ou l'anxiété et permettent ainsi de communiquer avec le cerveau.

Il communique également par voie nerveuse en produisant des neurotransmetteurs, des molécules qui assurent la transmission des messages d'un neurone à l'autre.

5

B12

B9

B9

B9

B12

B9

B12

B9

VOIE NERVEUSE

VOIE SANGUINE

# RETOUR VERS LE FUTUR

Il y a encore peu, personne n'imaginait que les microorganismes de notre intestin puissent avoir un rôle important dans notre santé.

Aujourd'hui, les scientifiques mettent en lumière les liens avec de nombreuses pathologies, ouvrant ainsi la voie à une véritable révolution dans notre approche de la santé.

## 1940'S La bonne méthode

L'histoire commence dans les années 1940 aux États-Unis, avec un chercheur en microbiologie, Robert Hungate, qui développe une technique – encore utilisée aujourd'hui – permettant de cultiver les bactéries du rumen (premier compartiment digestif des ruminants) de bovin, dont la particularité est de se développer uniquement dans des milieux sans oxygène [bactéries anaérobies strictes]. Jusqu'alors, il était impossible de les caractériser puisqu'il était impossible de les cultiver. Avec cette méthode, s'ouvre à la connaissance le monde encore

inconnu des microorganismes anaérobies qui siègent dans les écosystèmes digestifs des animaux et des humains.

## La question était claire : comment les microorganismes du rumen des bovins participent-ils à la digestion des fibres ?

## 1980'S Microbiote et production animale

À l'Inra, c'est en 1980 que se développent les premiers travaux sur ce que l'on appelait alors « la flore du rumen des animaux » au laboratoire de microbiologie du centre de Theix (Clermont-Ferrand). La question était claire : comment les microorganismes du rumen des bovins participent-ils à la digestion des fibres, la cellulolyse, une fonction majeure que l'on commençait à décrire au niveau moléculaire et cellulaire ?

« Nous avons été les pionniers dans la description de champignons anaérobies découverts dans le rumen des herbivores, puis nous avons été les premiers à

démontrer que les protozoaires produisaient des enzymes qui dégradent les fibres », se rappelle Évelyne Forano, directrice de recherche à l'unité mixte de recherche Medis. À cette même époque, en élevage, des antibiotiques étaient utilisés comme promoteurs de croissance. Les chercheurs se sont alors intéressés à comprendre les mécanismes d'action de ces antibiotiques administrés à faible dose, mais suffisante pour limiter la charge en pathogènes, afin de s'en passer pour répondre à une exigence réglementaire ! Une des pistes envisagées était d'enrichir leur microbiote en donnant aux animaux d'élevage des microorganismes vivants, appelés probiotiques, renforçant l'effet barrière contre les pathogènes ; c'est ainsi que les études sur les probiotiques utilisés dans le domaine de la nutrition des ruminants ont démarré.

## Où est passée la flore intestinale ?

Nous avons tous en tête le terme de flore intestinale pour représenter les microorganismes de notre système digestif. Ce terme disparaît au début des années 90, lorsque Carl Woese propose une nouvelle classification du règne du vivant. Jusqu'alors, les bactéries étaient considérées comme des végétaux, et c'est tout naturellement que les microorganismes étaient qualifiés de flore. Mais en 1990, la nouvelle classification de Woese, distinguant des bactéries, des eucaryotes (dont les végétaux) et des archées rend le terme de « flore » pour qualifier les bactéries ... inapproprié ! Il est alors remplacé par « le microbiote ».

## 1990'S

### De l'animal à l'humain

Impossible pour les scientifiques de ne pas s'interroger sur l'équivalent humain, appelé à l'époque la flore intestinale.

« On a appliqué toutes les méthodologies acquises sur le microbiote des animaux à l'étude du microbiote humain, explique Évelyne Forano, et cela a accompagné le développement à l'Inra des travaux sur la nutrition humaine, suite à la création du département scientifique NASA - Nutrition, alimentation et sécurité alimentaire. »

Dans le même temps, se développent de nouvelles techniques moléculaires dont le séquençage ADN. Une véritable révolution pour la science.

#### L'apport du séquençage ADN

Stanislav Dusko Ehrlich, alors directeur de recherche dans l'unité Génétique microbienne à Jouy-en-Josas, s'empare de ces nouvelles technologies permettant de mieux comprendre - et beaucoup plus rapidement - les rôles des bactéries lactiques. Convaincu que la connaissance du génome permettra d'expliquer la biologie des bactéries (croissance, reproduction, alimentation), Stanislav Dusko Ehrlich s'engage dans le séquençage du génome de *Bacillus subtilis*, dont la séquence complète sera publiée dans *Nature* en 1997. S'ensuivent de nombreux travaux pour caractériser le microbiote animal et humain à partir de l'analyse de son ADN: « Grâce à l'analyse ADN, on peut caractériser l'intégralité du système, y compris les bactéries difficilement cultivables (car sensibles à l'oxygène) qui représentent 70 % du microbiote », précise Joël Doré, directeur de recherche à l'institut Micalis<sup>1</sup> et directeur scientifique de l'unité MétaGénoPolis.

1. Unité mixte de recherche associant INRAE, AgroParisTech et l'université Paris-Saclay.

## 2000'S

### À quoi sert le microbiote ?

Si le séquençage ADN a permis de caractériser les microorganismes du microbiote, reste à savoir - et comprendre finement - à quoi celui-ci sert et comment il fonctionne. Petite histoire pour une grande recherche: « Nous discussions avec Joël dans un café, rue Claude Bernard, le père de la biologie moderne, ça ne s'invente pas!... », se souvient Hervé Blottière, alors biologiste à l'institut Micalis. Que peuvent se dire un microbiologiste et un biologiste cellulaire? « [...] On s'est dit qu'il fallait étudier le dialogue entre bactéries et cellules! » La boucle est bouclée, et c'est alors que naît une nouvelle approche, qui

consiste à analyser les interactions entre les cellules de notre corps et les microorganismes de notre microbiote: la métagénomique fonctionnelle! Les deux chercheurs, avec leurs équipes de l'institut Micalis, ont ensuite développé un outil (Métafun, plateforme de clonage-phénotypage haut débit) permettant d'incorporer dans la bactérie *Escherichia coli* des morceaux de génomes de microbes intestinaux. Ils obtiennent des milliers de clones qu'ils mettent en contact avec des cellules humaines capables d'émettre de la lumière ou de la couleur quand un dialogue s'installe. Cela permet ensuite de savoir quel gène microbien est responsable de modifications de fonctionnements observées dans les cellules humaines.

## Microbiote et santé

En croisant les techniques de métagénomique quantitative et fonctionnelle, les scientifiques ouvrent de nouvelles perspectives de recherches: comprendre le lien entre microbiote et santé. En métagénomique quantitative, on compare les microbiotes de malades et ceux de sujets sains, on obtient une caractérisation type de « microbiote malade » qui permet, par comparaison, de poser un éventuel diagnostic voire parfois de prédire l'occurrence de la maladie ou son aggravation chez un patient. En métagénomique fonctionnelle, il s'agit d'identifier les mécanismes d'interaction entre les cellules et les microorganismes, et leurs

conséquences qu'on suppose responsables de la maladie. L'objectif est alors, entre autres, de développer des médicaments pour rétablir un bon dialogue fonctionnel microbiote-hôte, et par la suite l'état de santé du patient. Autre méthode pour faire le lien entre microbiote et pathologies: utiliser des animaux axéniques, élevés en milieu stérile, et de fait dépourvus de microbiote. En leur implantant un microbiote de patient malade, on observe parfois qu'ils développent à leur tour les symptômes de la maladie. De manière assez logique, les scientifiques se sont intéressés en premier lieu aux maladies inflammatoires de l'intestin, dont la maladie de Crohn, pour laquelle le lien direct avec l'état du microbiote a été établi en 2006.



## 2010'S

### Le génome du microbiote décrypté, une avancée majeure pour la médecine

S'il y a une étape majeure dans la compréhension du microbiote, c'est bien celle-ci. « Our other genome », titre en mars 2010 la prestigieuse revue *Nature*. Après plusieurs années de travaux, dans le cadre du projet ANR MétaHit coordonné par Stanislav Dusko Ehrlich, le génome de milliards de microorganismes a été décrypté! Un premier catalogue de 3,3 millions de gènes est publié en 2010, complété en 2014 pour atteindre 10 millions de gènes. La question qui anime alors la sphère scientifique: avons-nous tous le même microbiote? L'hypothèse était qu'il existe un « microbiote moyen » humain avec une composition relativement identique en micro-

organismes. Magie de la science, « nous avons eu deux surprises avec ces travaux, se rappelle Joël Doré avec enthousiasme, la première est qu'il n'existe pas de microbiote moyen, mais au moins trois grands types de microbiotes!». Ou plutôt des entérotypes, c'est-à-dire trois organisations écologiques dominées chacune par un genre bactérien particulier: *Bacteroides*, *Ruminococcus* et *Prevotella*. « Deuxième surprise, on a observé des microbiotes riches et des microbiotes pauvres en termes de diversité de gènes, et donc de microorganismes. » La suite du raisonnement, vous vous en doutez: existe-t-il un lien entre les entérotypes, la richesse du microbiote et l'apparition de maladies chroniques? La réponse de Joël Doré est sans appel: « Oui, un microbiote pauvre et d'entérotipe *Bacteroides* est associé à un risque plus élevé de maladies cardiométaboliques. Ce sont des premiers résultats, et le chemin à parcourir est encore long! » En parallèle de ces découvertes majeures, la mise en évidence des liens entre microbiote et différentes pathologies s'enchaînent: en 2012, les scientifiques établissent un lien

entre microbiote et diabète de type 2, en 2013 avec l'obésité, en 2014, avec la cirrhose et avec le syndrome du foie gras. En 2018, les scientifiques découvrent que certaines bactéries du microbiote permettent de faciliter les traitements anti-cancéreux. Plus étonnant encore, des liens ont été démontrés entre le microbiote et les maladies neurodégénératives (sclérose en plaque, Parkinson et Alzheimer) ainsi que les maladies neuropsychiatriques (autisme, bipolarité, schizophrénie, dépression). Si le lien entre état du microbiote et ce type de pathologies a été observé chez l'animal au début des années 1980, les mécanismes qui régissent cette association ont été découverts récemment: une altération du microbiote entraîne une inflammation au niveau intestinal, qui favorise une perméabilité de la barrière hémato-encéphalique, dont le rôle est d'empêcher le passage de substances potentiellement toxiques ou d'agents pathogènes dans le cerveau et la moelle épinière. Cette perméabilité entraîne une →

#### MAAT PHARMA

### La start-up qui développe de nouvelles thérapies grâce au microbiote

Créée en 2014, à partir d'un savoir-faire de l'Inra, et plus largement en s'appuyant sur les travaux de Micalis et MétaGénoPolis, la start-up MaaT Pharma développe et standardise des technologies pour sécuriser l'utilisation thérapeutique du transfert de microbiote. Ses premiers travaux ont consisté à développer un processus

de conditionnement des contenus intestinaux qui permettait de les lyophiliser pour pouvoir les encapsuler. Les recherches concernent aujourd'hui le transfert de microbiote sain *via* ces capsules à des fins thérapeutiques dans le traitement du cancer. En effet, ce microbiote transféré permet de reconstruire la symbiose hôte-microbiote et ainsi de restaurer l'homéostasie immunitaire.

En 2016, leurs essais cliniques ont permis, grâce au transfert de microbiote, de reconstruire une symbiose normale chez 90% de patients atteints de leucémie

myéloïde aigüe ayant subi une chimiothérapie. En 2021, ils montrent que le transfert de microbiote améliore la survie des patients souffrant d'une maladie du greffon contre l'hôte, une complication sévère qui survient parfois suite à une greffe de moëlle osseuse dans le traitement du cancer du sang. Aujourd'hui, ils travaillent au développement de candidats-médicaments exploitant le potentiel des écosystèmes microbiens applicables tout au long du parcours clinique de patients atteints de cancer. [maatpharma.com/fr](http://maatpharma.com/fr)

inflammation au niveau du cerveau qui favoriserait l'apparition des maladies neurodégénératives et neuropsychiatriques. En 2017, un lien fort entre le microbiote et les troubles du spectre autistique a été confirmé. Des travaux se poursuivent dans le cadre du projet européen Gemma (2019-2025) pour étudier le rôle du microbiote intestinal dans ces troubles. C'est aussi dans les années 2010, qu'est créé MétaGénoPolis, un démonstrateur préindustriel, avec des équipements de pointe pour aller plus loin et plus vite dans la connaissance du microbiote et développer des innovations pour la société (voir reportage photo p.56).

## Une vie en symbiose

Au fur et à mesure des découvertes sur les liens entre santé et microbiote, une nouvelle façon de penser ces liens apparaît. Il ne suffit pas d'agir directement sur le microbiote mais bien de prendre en compte l'ensemble « microbiote et hôte » et donc de soigner également son environnement (l'hôte), notre corps. Les résultats le montrent, c'est bien la façon dont nous prenons soin de nous qui permet le bon équilibre de notre microbiote et réciproquement participe à notre bonne santé. Le concept de symbiose entre microbiote et hôte s'impose alors et fait émerger celui de dysbiose, celle-ci survenant quand la symbiose est altérée ! La dysbiose peut survenir en cas de stress oxydatif, diminution de la diversité bactérienne, augmentation de la perméabilité de la barrière intestinale ou d'un état inflammatoire, autant de causes qui expliquent le lien avec les nombreuses pathologies décrites ci-dessus. Une fois l'équilibre altéré,

ces paramètres entretiennent alors un cercle vicieux créant un contexte favorable à certaines maladies chroniques aujourd'hui incurables.

## Transfert de microbiote

Si les liens entre microbiote et certaines pathologies sont si évidents, pourquoi ne pas transférer un microbiote sain chez un individu malade pour le soigner ? C'est l'idée qui a conduit à créer la start-up Maat Pharma (voir p.53) en 2014, dont Joël Doré est toujours conseiller scientifique. L'Inra et Maat Pharma développent alors conjointement une technique de transfert de microbiote qui consiste à administrer une suspension des selles de donneurs sains dans le système digestif d'un receveur malade afin de restaurer la richesse de son microbiote et apporter un bénéfice pour sa santé. Les résultats obtenus en 2016 sont prometteurs. S'il existe encore des risques à transférer des microorganismes d'un individu à l'autre, ces travaux ouvrent de nouvelles voies de traitement de pathologies sévères pour lesquelles la médecine n'a parfois plus aucune solution à apporter.

**Près de 2 000 espèces de microorganismes ont été identifiées. Chaque être humain en abrite environ 300.**

## Microbiote et Covid-19

**3 questions à Philippe Langella, directeur de recherche à l'institut Micalis**

**Existe-t-il un lien entre Covid et microbiote ?** Des analyses du microbiote intestinal de patients atteints de la Covid-19 montrent une dysbiose, c'est-à-dire un déséquilibre du microbiote, qui se caractérise par une baisse des bactéries ayant une activité anti-inflammatoire, baisse d'autant plus importante que la forme de la Covid-19 est grave.

**Est-ce qu'il existe des pistes pour éviter une telle dysbiose en cas de Covid ?** Depuis de nombreuses années, notre laboratoire met au point des stratégies de prévention et thérapeutiques basées sur des bactéries probiotiques de nouvelle génération pour lutter contre l'inflammation intestinale. L'idée est d'évaluer si elles ne pourraient pas être utilisées en complément chez les patients Covid pour éviter les atteintes intestinales qui sont constatées chez 20 % d'entre eux.

**Que sont les probiotiques de nouvelle génération ?** Les probiotiques sont des microorganismes vivants que l'on ingère dans l'objectif de rétablir ou entretenir notre symbiose hôte-microbiote. Jusqu'à présent, les probiotiques utilisés étaient soit issus de la consommation d'aliments fermentés, soit de compléments alimentaires, mais toujours obtenus à partir de ferments naturels. La nouvelle génération de probiotiques est maintenant issue directement du microbiote intestinal.

## 2020'S

### Le renouveau de la médecine préventive

Les travaux sur la symbiose hôte / microbiote se poursuivent et prennent de l'ampleur. Un nouveau projet, *Le French Gut* démarre en 2022 et ambitionne de caractériser le microbiote des Français à partir d'une collecte de selles de 100 000 volontaires. Au-delà de nouvelles perspectives de recherches, pour Joël Doré, ces travaux offrent une nouvelle façon de raisonner sur la santé, d'aller vers une nutrition préventive et d'utiliser le microbiote comme levier.

### Diagnostic et médication

Concernant le diagnostic, on pourra sans doute un jour faire une analyse de microbiote comme on fait une analyse de sang pour évaluer l'état de la symbiose et aider à la prise en charge de pathologies. Sur la médication : « *D'après nos premiers résultats, agir sur le microbiote, sur la perméabilité de la barrière intestinale, l'inflammation et le stress oxydant en même temps aurait des effets aussi efficaces que des médicaments standards* », explique Joël Doré. En effet, une expérimentation chez la souris montre qu'une combinaison entre un probiotique (protecteur de la barrière intestinale et avec des propriétés anti-inflammatoires) de la glutamine (acide aminé qui protège également la barrière intestinale) et de la curcumine (polyphénol, anti-inflammatoire et antioxydant), agit sur les quatre facteurs de dysbiose et donne des résultats aussi efficaces pour traiter la dépression qu'un antidépresseur, la clomipramine, les effets secondaires en moins. Autant dire que la révolution du microbiote ne fait que commencer !

#### LE FRENCH GUT

### Cartographier le microbiote des Français

Pour aller encore plus loin dans la connaissance du microbiote et de ses liens avec la santé, INRAE démarre en 2022 un projet ambitieux, *Le French Gut – Le microbiote français*. L'objectif est, d'ici 2025, de collecter les selles de 100 000 volontaires ainsi que les données nutritionnelles et cliniques associées, et de les analyser pour mieux comprendre ce qu'est un microbiote intestinal sain et quelles sont les altérations

observées en cas de maladies. *Le French Gut*, porté par INRAE, est mené en partenariat avec des institutions publiques et privées, impliquées dans la connaissance du microbiote. Il s'agit *in fine* d'ouvrir la voie à des thérapies innovantes pour traiter des maladies chroniques (diabète, obésité, cancer...) et des troubles neuro-développementaux. *Le French Gut* s'insère dans un programme mondial *Million Microbiome of Humans Project (MMHP)* qui vise à analyser un million d'échantillons microbiens des intestins, de la bouche, de la peau, de l'appareil reproducteur.

[url.inrae.fr/3JiLEp4](http://url.inrae.fr/3JiLEp4)

#### LES MICROORGANISMES

### TOUT UN MONDE

Le microbiote intestinal n'est pas le seul présent dans notre corps, mais c'est à ce jour le plus documenté.. Nous avons un microbiote sur la peau, dans la bouche, dans le vagin, dans les poumons, l'œil, etc. Tous ces microorganismes forment un microbiome qui lui-même forme, avec son hôte, un holobionte. Mais des microorganismes, il y en a aussi dans notre environnement, dans la terre, l'air, les plantes, sur et dans les animaux.

Tous ces microbiomes peuvent interagir et ces interactions, à une échelle plus globale, sont encore un terrain peu connu de la recherche. Un exemple, l'antibiorésistance.

À force d'utiliser des antibiotiques pour notre santé et celle des animaux, on favorise l'émergence de bactéries résistantes aux antibiotiques. Cela devient un problème mondial qui touche à la fois notre santé, celle des animaux et celle de l'environnement. En 2020, INRAE a lancé un métaprogramme de recherche, appelé *Holoflux*, « *Holobiontes et flux microbiens au sein des systèmes agri-alimentaires* ».

Son objectif est d'arriver à une meilleure connaissance, d'une part des interactions au sein des holobiontes, entre microbiotes et hôtes, et d'autre part des flux de microorganismes entre les holobiontes et dans l'ensemble du système agri-alimentaire. Cette connaissance permettrait de les utiliser comme leviers de performance, de durabilité et de préservation de la santé humaine, animale et végétale.



①

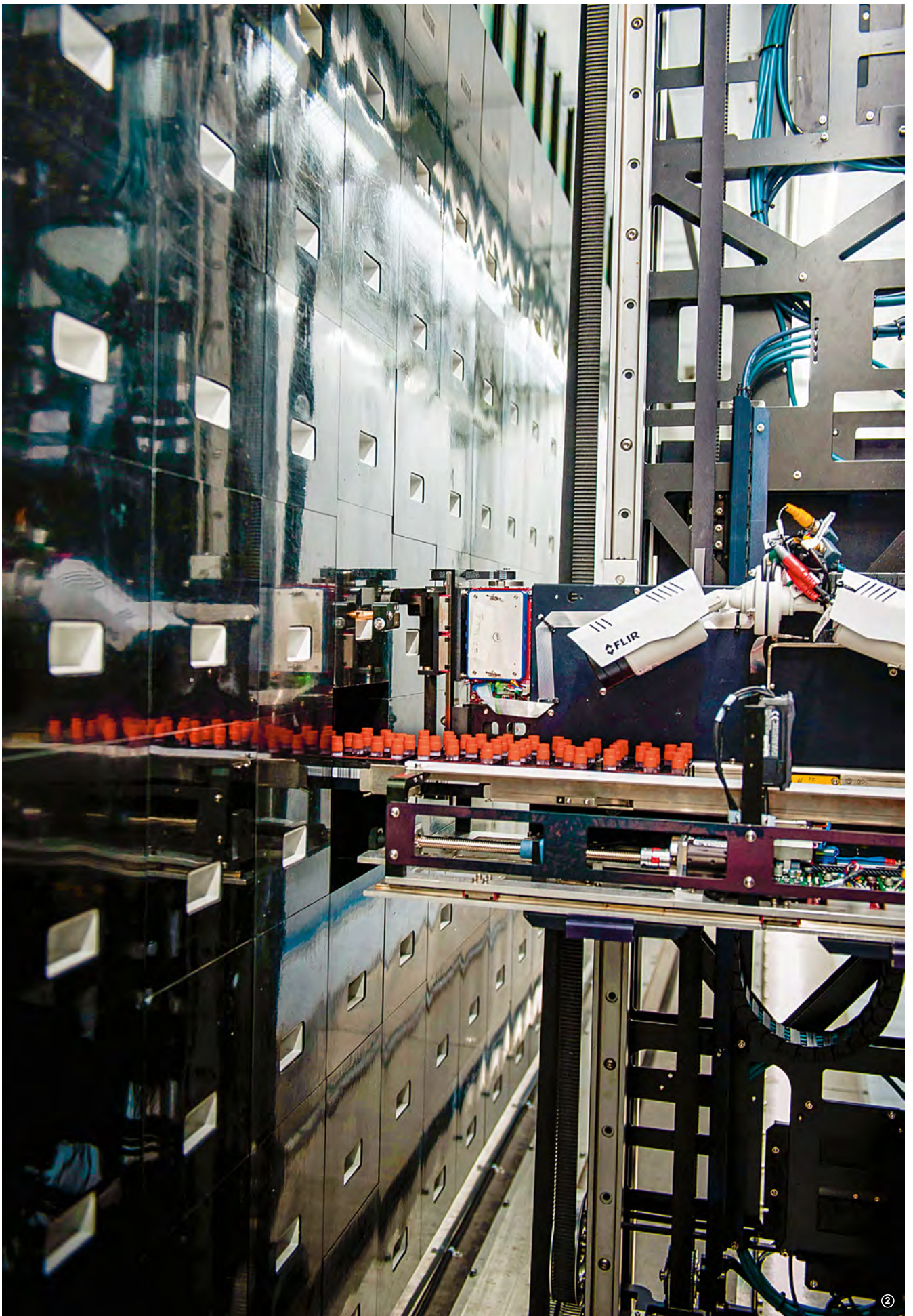
---

## **Au cœur des labos** MétaGénoPolis, un lieu unique au service de la connaissance du microbiote

Entrons dans les laboratoires de MétaGénoPolis, démonstrateur préindustriel situé à Jouy-en-Josas (Yvelines), qui explore le microbiote intestinal à la fois de façon quantitative et fonctionnelle, grâce à des équipements de pointe.

De la collecte des échantillons jusqu'à l'analyse bioinformatique et la production de connaissances scientifiques, MétaGénoPolis est un acteur international incontournable de la science du microbiote.  
© INRAE – Bertrand Nicolas

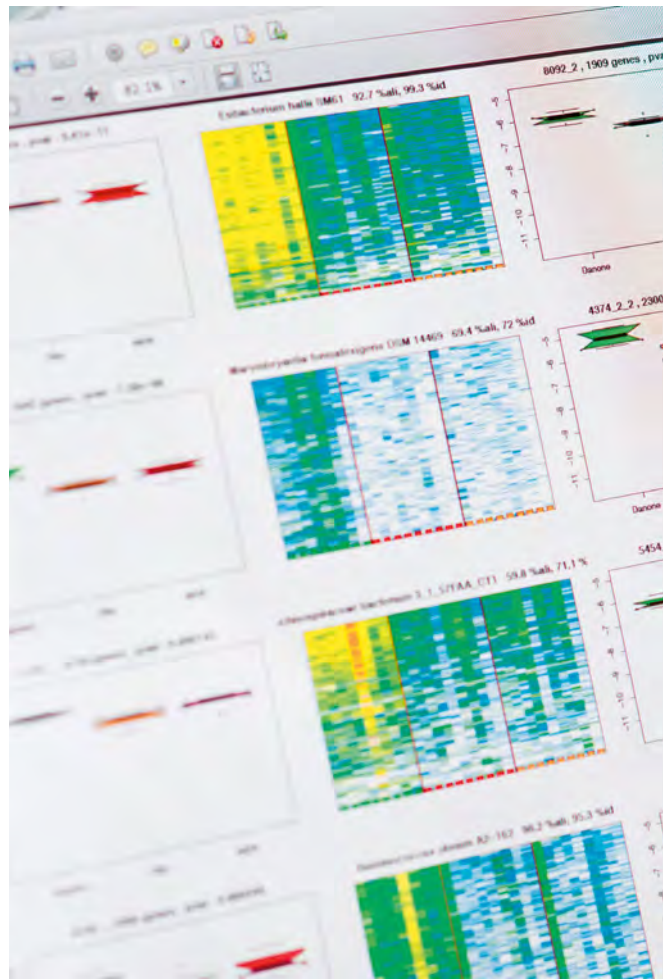
---







④



⑤

**① La collecte et la gestion des échantillons**

Que ce soit dans le cadre d'essais cliniques ou de projets de recherche, la première étape est la collecte de selles de cohortes ou d'individus volontaires. Pour cela, MétaGénopolis, dans le cadre du projet International Human Microbiome Standards (IHMS) qu'il coordonne, a élaboré des procédures standardisées de référence mondiale de préparation des échantillons de selles, visant à garantir leur intégrité et celle de leur ADN extrait pour une analyse robuste du microbiote.

**② La biobanque, lieu de gestion et de stockage des échantillons fécaux**

Lorsque les échantillons ont été

obtenus, des aliquots dotés chacun d'un code-barre pour les identifier sont générés. Ces aliquots sont ensuite stockés de façon sécurisée dans la biobanque. Entièrement automatisée, elle permet de conserver jusqu'à 600 000 aliquots et extraits d'ADN à - 80 °C. Un bras robotisé dépose ou récupère les tubes à chaque analyse ou expérimentation.

**③ Préparation des ADN extraits des échantillons en vue de leur séquençage**

Avant de pouvoir séquencer l'ADN des microorganismes présents dans les échantillons et ainsi les caractériser, il est nécessaire d'extraire cet ADN en le séparant des autres composants cellulaires et résidus présents dans les échantillons. Cela

fait intervenir des étapes de cassage physique et chimique et des techniques de séparation éprouvées et standardisées.

**④ Séquençage à haut débit de l'ADN de microorganismes**

Le séquençage à haut débit de l'ADN des microorganismes (principalement des bactéries) vivant dans le tube digestif, permet la caractérisation du microbiote intestinal. MétaGénoPolis utilise la méthode de séquençage entier, appelée « métagénomique shotgun », qui s'intéresse à l'ensemble des gènes des microorganismes accessibles. À l'aide d'une base de données de gènes référente, les fragments d'ADN lus par le séquenceur permettent d'identifier les gènes des microorganismes



⑥

présents dans l'aliquot et leur proportion. Un volume considérable de données informatiques est ainsi généré et analysé.

#### ⑤ Analyse informatique et biostatistique

Après le séquençage des ADN, les scientifiques obtiennent une quantité importante de données qui sont ensuite analysées pour répondre à différentes questions: étudier l'impact de la consommation d'un produit, d'un régime alimentaire, ou d'un probiotique sur le microbiote intestinal par exemple. Le croisement des données des individus d'une même cohorte peut permettre d'identifier le rôle du microbiote dans les maladies comme l'obésité, le diabète, les maladies

inflammatoires ou encore la cirrhose du foie.

#### ⑥ Plateforme de criblage pour l'analyse métagénomique fonctionnelle

Cette plateforme automatisée de criblage à haut débit permet l'analyse des interactions entre micro-organismes et lignées cellulaires épithéliales ou immunitaires. La métagénomique fonctionnelle permet ainsi de mieux comprendre la fonction de chacune des bactéries du microbiote intestinal, de décoder les interactions hôte-microbiote et d'identifier des nouvelles molécules-cibles d'intérêt thérapeutique. ●

Pour aller plus loin  
→ [youtu.be/rxuvV0-pC0k](https://youtu.be/rxuvV0-pC0k)

**140** publications scientifiques dont de nombreuses dans des revues à facteur d'impact élevé. 15 de ces publications figurent parmi les plus citées dans le monde.

**82** projets de recherche avec plus de 100 partenaires publics (dont 8 projets européens et 5 projets internationaux) pour un budget global de 18 millions d'euros.

**154** projets de recherche en vue d'innovation avec 69 partenaires privés de l'agro-alimentaire et de la santé, pour un budget global de 24 millions d'euros.

**36** brevets, 10 licences.



## Excellence scientifique et innovation

3 questions à Alexandre Cavezza,  
directeur exécutif de MétaGénoPolis

Créé en 2012 grâce au financement du Programme d'investissement d'avenir (PIA1), MétaGénoPolis est un démonstrateur préindustriel porté par INRAE, dont la mission est de comprendre les liens entre microbiote, santé et alimentation. À l'interface entre excellence scientifique et innovation avec les entreprises, MétaGénoPolis est expert dans l'analyse du microbiote intestinal humain et animal.

### Quels sont les atouts de MétaGénoPolis ?

Nous avons des équipements uniques à la pointe de la technologie et des processus certifiés ISO 9001. C'est le cas par exemple de la biobanque et son système de code-barres et d'automatisation qui permet de stocker de façon standardisée et sécurisée près de 600 000 échantillons fécaux. Nous avons également plusieurs plateformes robotisées pour faire du haut débit dans l'analyse métagénomique. Il s'agit à la fois de faire de l'analyse quantitative du

microbiote pour connaître sa composition et faire de la métagénomique fonctionnelle pour comprendre les interactions entre les microorganismes et leur hôte. Ce sont des technologies très performantes qui permettent d'analyser une grande quantité d'échantillons en très peu de temps.

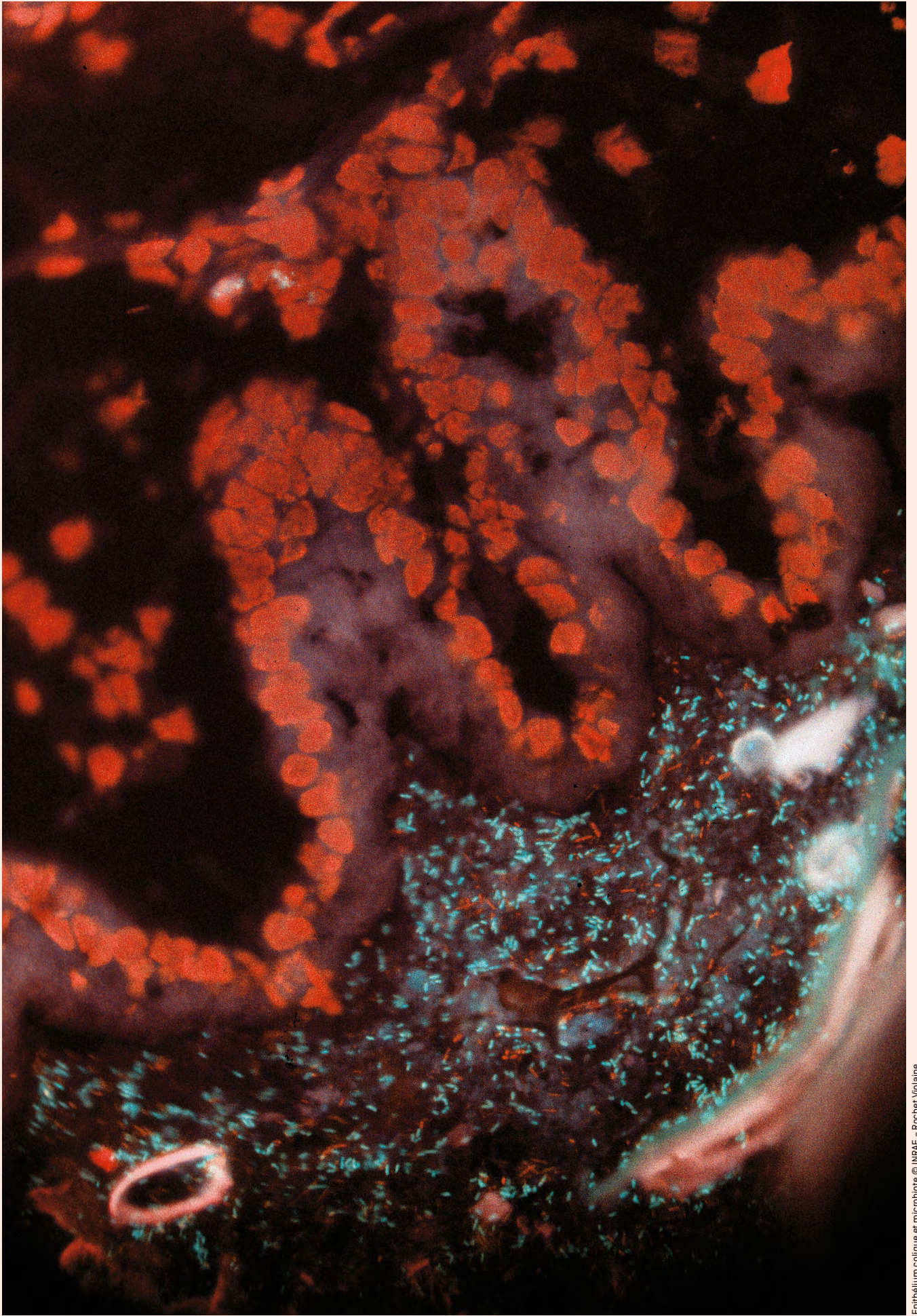
### Quels sont vos liens avec les industriels ?

Ils sont nombreux, et c'est tout le principe du démonstrateur préindustriel. Nous travaillons avec des partenaires privés et publics principalement dans le cadre de collaborations de recherches. MétaGénoPolis est à l'interface entre recherche publique et acteurs privés. Avec près de 150 publications scientifiques publiées dans des revues de haut rang depuis sa création, MétaGénoPolis produit une recherche d'excellence. Ces connaissances scientifiques, nous les valorisons en travaillant avec des industriels, en particulier autour de la preuve de concept, étape clé de passage de la recherche fondamentale à un développement industriel. C'est une étape délicate et coûteuse que notre structure permet de réaliser. C'est le cas, par exemple, pour la conception d'une baguette de pain enrichie en fibres végétales, l'ambiote, véritable nourriture pour les bactéries de notre microbiote, et commercialisée depuis 2019. La valorisation de nos résultats se fait également par la création de

start-up : MaatPharma [\(voir p.53\)](#), Enterome qui développe de nouveaux médicaments en interaction avec le microbiote, et Novobiome qui développe des médicaments contenant des microorganismes vivants ayant une influence positive sur la santé et la physiologie de l'hôte.

### Quelles sont vos perspectives ?

Nous avons deux projets très structurants qui démarrent et qui seront au centre de notre activité. Le premier, Le French Gut, consiste à caractériser le microbiote intestinal d'une cohorte de 100 000 personnes résidant en France métropolitaine [\(voir p. 55\)](#). Cela permettra de créer de la connaissance et développer des partenariats aussi bien avec des partenaires publics (Inserm, APHP, CEA, etc.) qu'avec des industriels au sein d'un consortium et ainsi créer de la valeur commune. Il s'agit en particulier de mieux comprendre l'hétérogénéité des microbiotes intestinaux sains français, les facteurs environnementaux et de mode de vie les impactant, ainsi que leurs déviations dans les maladies chroniques. L'autre projet auquel nous contribuerons est le grand défi « Ferments du futur », de la stratégie d'accélération « Alimentation durable favorable à la santé » du PIA4, dont l'objectif est de comprendre l'impact des ferments sur notre santé et sur le microbiote afin de leur donner toute leur place dans l'alimentation saine et durable de demain.



Les découvertes récentes le montrent, les liens entre microbiote et santé sont nombreux. Bonne nouvelle, il existe des moyens de prendre soin de son microbiote et de préserver nos interactions avec lui.  
**Le point sur les facteurs clés d'une vie en symbiose.**

# PRENDRE SOIN DE SA SYMBIOSE

Avec les microorganismes de notre intestin, quand tout va bien, nous sommes en symbiose, dans une relation gagnant-gagnant. Nous offrons à notre microbiote le gîte et le couvert, et en retour il nous rend de nombreux services : il digère les fibres des végétaux et produit de l'énergie, il stimule nos défenses immunitaires, il produit des vitamines, il protège la barrière intestinale et envoie des messages importants au cerveau.

Cet équilibre participe à notre bon état de santé général. Il apparaît alors nécessaire d'être aux petits soins avec nos microorganismes *via* leur hôte, notre corps, pour que la symbiose soit préservée. Car lorsque ce n'est pas le cas, nous prenons le risque d'être en dysbiose, laquelle est associée à de nombreuses pathologies : obésité, diabète de type 2, syndrome du côlon irritable, troubles du spectre autistique, anxiété, dépres-

**1000**  
premiers jours  
de la vie pour  
développer  
ses capacités  
immunitaires

sion, cirrhose, sclérose en plaque, allergies, maladie de Crohn. La liste est longue. À l'inverse, la symbiose apporte également certains bienfaits « collatéraux ». Par exemple, elle peut limiter l'effet des contaminants alimentaires ou encore prévenir les risques de fonte musculaire dont les seniors sont souvent victimes en vieillissant.

Que faut-il pour être en symbiose ? La réponse est simple (ou presque) : avoir un microbiote riche, à la fois en nombre de microorganismes et en nombre d'espèces différentes, et un hôte qui apporte ce dont le microbiote a besoin pour maintenir cette diversité. Alors comment entretenir la richesse de notre microbiote ? Comment donner à notre microbiote tout ce dont il a besoin pour maintenir sa diversité ? En d'autres termes, comment prendre soin de sa symbiose ? La preuve par 4. →

01

## En le nourrissant avec une alimentation variée et riche en fibres

Notre microbiote est composé de microorganismes qui ne se nourrissent pas tous de la même chose. Avoir une alimentation variée, en particulier avec des fruits et légumes riches en fibres et en polyphénols, c'est assurer le maintien d'une diversité bactérienne. Les fibres, non digestibles par les enzymes humaines, les bactéries du microbiote en raffolent. Existe-t-il une alimentation idéale pour notre symbiose ? Des études montrent que le régime méditerranéen fait office de bon candidat : riche en fruits et légumes, et donc en fibres, peu de viande rouge et une cuisine à l'huile d'olive qui apporte des acides gras de bonne qualité. Les scientifiques montrent également que le régime « fast food et aliments ultra-transformés » a indirectement un effet délétère sur le microbiote car lorsque l'on réduit l'apport de fibres, les microorganismes sont alors privés d'une source importante de carbone et d'énergie, le microbiote s'attaque au mucus de la paroi intestinale pour se nourrir, l'affaiblit et la rend perméable aux molécules et pathogènes

**« C'est 25 fruits et légumes différents par semaine qu'il faudrait manger »** Joël Doré

02

## En le stimulant les 1000 premiers jours de la vie

L'installation du microbiote se fait au moment de la naissance. *In utero*, le bébé est dans un environnement stérile, mais dès la rupture de la poche des eaux, le corps du bébé (et pas seulement son intestin), va être colonisé par les microorganismes qu'il va rencontrer, principalement par ceux de sa mère. « *Le développement du microbiote du bébé pendant les premières années de sa vie se fait complètement en parallèle de la maturation de son système immunitaire* », précise Hervé Blottière, microbiologiste à l'unité PhAN (PhysioPathologie des adaptations nutritionnelles). « *Si cette maturation se fait bien, le bébé va être en symbiose entre ses cellules et ses microorganismes, mais si la symbiose est perturbée, il y a un risque de maladie infectieuse et de trouble immunitaire entraînant le développement de maladies chroniques.* »

Alors, comment prendre soin de sa symbiose dès la naissance ? Par l'alimentation bien sûr, en particulier avec du lait maternel qui contient lui-même un microbiote, puis avec une alimentation diversifiée. Mais aussi par une exposition dès le plus jeune âge à des microorganismes, ceux de sa mère, lors d'un accouchement par voie basse, puis ceux de son environnement : jouer dans la terre, avoir des animaux de compagnie, tous ces facteurs jouent sur la composition de notre microbiote et la maturation de nos défenses naturelles.

À l'inverse, la prise d'antibiotiques dans les premières années peut retarder ou modifier la maturation du microbiote et du système immunitaire par la diminution de la diversité bactérienne, la diminution des bactéries bénéfiques, voire l'augmentation des résistantes. Si généralement, il y a un retour à la normale, on observe dans certains cas une persistance de l'altération du microbiote qui augmente le risque de développer certaines maladies.

03

## En ayant une bonne hygiène de vie

Parce que prendre soin de sa symbiose c'est aussi prendre soin de l'hôte... Pour éviter d'être en dysbiose, il faut alors prendre soin de sa barrière intestinale, et limiter ce qui pourrait entraîner des états inflammatoires ou du stress oxydatif, et par suite augmenter le risque de cancer colorectal... Il s'agit par exemple de limiter la consommation d'alcool, ou de produits carnés, qui va induire une perméabilité intesti-

nale : les cellules de la barrière intestinale s'écartent et laissent passer des molécules qui ne passeraient pas en temps normal. De même, lorsque l'on est stressé ou anxieux, il y a libération dans le sang de cortisol qui a également un effet sur la perméabilité de la barrière intestinale. L'environnement dans lequel nous vivons et l'exposition à différents contaminants (dans l'air, l'eau) semblent également influencer sur l'état de notre symbiose. Quant à l'activité physique, elle serait bénéfique à la diversité du microbiote et donc hautement recommandée !

04

## En lui apportant des probiotiques

La diversité des microorganismes est le facteur clé de la symbiose. Une voie possible est alors d'en ingérer. C'est le principe des probiotiques. Ce sont des microorganismes vivants (bactéries ou levures) que l'on retrouve naturellement dans les produits fermentés, fromage, yaourt, choucroute crue, pain, etc.

Ils peuvent être ajoutés à certains produits alimentaires, les yaourts en tête de file, ou encore consommés en compléments alimentaires.

Les probiotiques ont des bienfaits sur notre microbiote pour deux raisons. La première est qu'ils apportent naturellement des microorganismes vivants qui augmentent la diversité de notre microbiote. La seconde est que le processus de fermentation opéré par les enzymes des microorganismes apporte aux aliments des métabolites d'intérêts variés pour le microbiote et plus largement pour notre santé. Plus encore, les études montrent que les probiotiques, selon la souche utilisée, aident à la digestion du lactose, peuvent prévenir ou réduire les diarrhées liées à la prise d'antibiotiques ou à certaines infections virales, et renforcent la barrière intestinale.

## La diversité des microorganismes est le facteur clé de la symbiose.

### Dysbiose

Elle se produit sous l'effet de facteurs externes (certains médicaments, consommation d'alcool...) ou quand la relation microbiote-hôte est altérée, engendrant une perte de diversité bactérienne, une augmentation de bactéries pathogènes, une augmentation de la perméabilité de la barrière intestinale et, par la suite, un affaiblissement de l'organisme et de ses capacités immunitaires.

### Amibiote

Petit coup de pouce de la science, les chercheurs de l'institut Micalis ont conçu une baguette de pain, l'amibiote, enrichie en fibres végétales, et dont les effets santé ont été mis en évidence : contrôle du taux de cholestérol et amélioration de la sensibilité à l'insuline chez des sujets à risque métabolique.

### ENJEU

## Le grand défi des aliments fermentés

**Yaourts, fromages, pain, choucroute, olives, vin, kéfir, tofu, kombucha, kimchi..., les aliments fermentés prendront-ils une plus grande place dans nos assiettes ? C'est en tout cas une piste sérieuse pour obtenir des bénéfices santé via l'alimentation.**

**Le consommateur s'y met déjà : « De plus en plus de citoyens font fermenter leurs légumes eux-mêmes », mais au-delà des micro-tendances, Marie-Christine Champomier-Vergès, directrice de recherche à l'institut**

**Micalis, rappelle qu'il y a un véritable enjeu à développer des aliments fermentés et à comprendre finement les rôles des ferments dans la santé de notre microbiote et de notre santé en général. En effet, la fermentation conduit à la production de composés bioactifs, qui, associés à la présence de bactéries probiotiques dans certains de ces produits, peut leur conférer un intérêt pour la santé. De nombreuses questions se posent : quelles sont les interactions entre les aliments et les microorganismes ? Quelles méthodes de fermentation ? Avec quelles souches ? Pour quel goût ? Pour quel effet**

**nutritionnel ? Quelles interactions entre les microorganismes de l'aliment et notre microbiote intestinal ?... Et quelle réglementation ? « Introduire des microorganismes dans notre alimentation, parfois des souches qui ne sont pas consommées habituellement, c'est nouveau et ce n'est pas anodin, il est nécessaire de s'interroger en parallèle de nos recherches sur les réglementations qui accompagneront ces nouveaux produits ». La science s'empare de ces questions.**

**Un projet de science participative, Flegme, fait appel aux citoyens pour étudier les légumes fermentés issus de productions artisanales. Un réseau européen, PIMENTO, se fédère autour de ces questions. Enfin, dans le cadre du Programme d'investissement d'avenir (PIA4), un grand défi sur les « Ferments du futur », a été proposé par INRAE et l'ANIA [Association nationale des industries alimentaires] pour maintenir le leadership international de la France en matière de produits fermentés.**

# QUELLES GESTIONS DES FORÊTS POUR DEMAIN ?

Production de bois, espace de loisirs, puits de carbone...  
Les forêts offrent de multiples services essentiels aux humains et à la Terre. Face à des aléas météorologiques qui s'intensifient avec le réchauffement climatique et des changements globaux menaçants (commerce international, déforestation), certains massifs dépérissent à un rythme inquiétant et nous invite à revoir la façon de gérer les forêts.



## RESSOURCES ET SERVICES RENDUS PAR LES ÉCOSYSTÈMES FORESTIERS

Les écosystèmes forestiers procurent de nombreux services aux sociétés humaines via divers processus : photosynthèse, recyclage des débris végétaux et d'animaux, croissance des arbres...

Outre la fourniture de ressources alimentaires et de matériaux, ils régulent le climat local, et participent à l'atténuation du changement climatique via le stockage de carbone. Les régions boisées jouent aussi un rôle épurateur pour les eaux de surface ou souterraines et contribuent à sa disponibilité en favorisant localement les précipitations.

Enfin, les arbres sont une protection contre les aléas naturels (crues, avalanches et glissements de terrain...), notamment en structurant par leurs racines la formation des sols. La qualité de ces services dépend des types de forêt (densité, âge des arbres, mode de gestion, historique d'usage des sols) et de leur biodiversité.



### SERVICES DE SUPPORT

- ① Contribution aux cycles biogéochimiques globaux
- ② Production de matière organique grâce à la photosynthèse
- ③ Structuration des sols
- ④ Conservation de la biodiversité

### SERVICES DE RÉGULATION

- ⑤ Régulation du climat global et du microclimat local
- ⑥ Protections contre les aléas naturels
- ⑦ Protection contre l'érosion des sols



### SERVICES D'APPROVISIONNEMENT

- ⑧ Produits alimentaires
- ⑨ Disponibilité en eau douce
- ⑩ Bois
- ⑪ Molécules biosourcées



### SERVICES CULTURELS

- ⑫ Loisirs sportifs ou artistiques et éco-tourisme
- ⑬ Identité culturelle
- ⑭ Santé physique et bien-être mental
- ⑮ Chasse



# UN MONDE DE FORÊTS

Les forêts sont des écosystèmes complexes et riches qui couvrent de vastes régions du globe. Elles forment des habitats pour de nombreuses espèces animales, végétales et microbiennes qui entretiennent de nombreuses relations.

**Panorama.**

Au niveau mondial, les forêts abritent une grande diversité d'espèces d'arbres (73 300)<sup>1</sup>, avec des exigences et des capacités d'adaptations variables: certaines préfèrent un climat tempéré quand d'autres sont aptes à supporter des températures extrêmes (caniculaires et froides) ou capables de se développer sur des sols contraignants malgré le manque d'eau ou la présence de sel. Les arbres conditionnent la structure et le fonctionnement de ces écosystèmes et influent sur la biodiversité qui s'y développe, c'est pourquoi on les qualifie d'espèces « clés de voûte ».

La répartition des forêts à l'échelle globale s'explique principalement par les conditions climatiques passées et actuelles qui définissent cinq grands domaines: boréal, polaire, tempéré, subtropical et tropical.

**Les arbres conditionnent la structure et le fonctionnement des écosystèmes que sont les forêts.**

**73 300**  
espèces d'arbres  
dans les forêts  
mondiales

↓  
**-20%**  
de surface  
forestière dans  
le monde en  
un siècle

## **Des caractéristiques variables selon les forêts<sup>2</sup>**

**Les régions tropicales** sont caractérisées par de fortes pluies toute ou une partie de l'année. Leurs paysages boisés sont extrêmement denses et diversifiés comme ceux luxuriants d'Amazonie (dont la Guyane française) et d'Asie du Sud-Est ou ceux, plus secs, du Bassin du Congo.

**Les forêts des régions subtropicales**, au climat plus chaud (22 °C de moyenne minimale) et aux saisons très contrastées, englobent une grande variation de couverts boisés: mangroves, forêts de pins, savanes arborées... On les retrouve au Mexique, sur le pourtour méditerranéen, au centre de l'Australie, ou bien encore au sud de la Chine et du Japon.

**En zone boréale**, s'étendent des forêts (taïga) essentiellement constituées de conifères et de bouleaux, aptes à résister aux hivers rudes (entre -20 °C et -60 °C) et à tolérer une photopériode contrastée entre saisons. On retrouve ces paysages du Canada à la Russie, en passant par les pays scandinaves et la France *via* l'archipel de Saint-Pierre-et-Miquelon. En zone polaire, les températures estivales, inférieures à 10 °C sont trop basses pour permettre la croissance des arbres.

**Dans les forêts des zones tempérées**, aux températures et aux précipitations annuelles moins →

extrêmes, on trouve des arbres à feuilles caduques et des conifères. Selon l'altitude, la présence de cours d'eau et la nature des sols, certaines espèces sont plus ou moins dominantes. On retrouve ces forêts majoritairement dans l'hémisphère nord, de l'Amérique du Nord à l'Europe, mais également au sud de l'Australie et en Amérique du Sud.

### L'impact de l'humain

Les divers espaces forestiers ont été, au fil du temps, plus ou moins gérés et impactés directement ou indirectement par les activités humaines, ce qui en fait des socio-écosystèmes. Ils ont parfois été fortement dégradés par les sociétés humaines au profit des terres agricoles, des villes, des infrastructures de transport ou des zones d'activités pour une population toujours plus nombreuse.

En un siècle, les forêts mondiales ont perdu 20 % de leur surface. Ce phénomène de déforestation (conversion des forêts vers d'autres usages, notamment agricoles) pour lequel on observe un léger ralentissement ces 30 dernières années est inégalement réparti : les forêts de l'hémisphère nord sont généralement en expansion, quand celles de l'hémisphère sud perdent du terrain. Fait notable : depuis 2010, la déforestation est plus intense en Afrique qu'en Amérique du Sud. ●

1. Estimation récente (Gatti et al. PNAS 2022).

2. Classement réalisé d'après le rapport FAO 2020 (figure 8, p.19) : [fao.org/3/ca8642fr/ca8642fr.pdf](https://fao.org/3/ca8642fr/ca8642fr.pdf)

## Les forêts de l'hémisphère nord sont généralement en expansion, quand celles de l'hémisphère sud perdent du terrain.

### DÉFINITION

## Qu'entend-on par forêt ?

La définition de la forêt diffère suivant le lieu où l'on se trouve, les valeurs qu'on lui accorde, les biens et les services que les êtres humains en attendent. Pour la FAO, la forêt est un couvert arboré recouvrant au moins 10 % d'une surface d'un demi-hectare (5 000 m<sup>2</sup>). L'arbre est ici défini comme une plante pérenne d'une seule tige (ou plusieurs si elle est recépée) qui atteint au moins 5 m de hauteur à maturité. Pour estimer et connaître l'état, l'évolution et les potentialités d'une forêt, les forestiers se sont accordés sur trois critères [couvert forestier, surface

et composition en essences du peuplement] avec des valeurs de référence qui varient selon les pays et les institutions. L'inventaire forestier national français ajoute un critère de largeur de couvert (au moins 20 m), excluant ainsi les alignements d'arbres. À ces critères s'ajoute une notion d'usage des terres qui doit être strictement à vocation forestière et non agricole ou urbaine. Les plantations d'arbres à destination de la production de bois sont ainsi considérées comme « forêts » contrairement aux vergers et aux parcs.

### TYPOLOGIE

## Plantées ou naturellement régénérées ?

On entend par forêts « naturellement régénérées » celles où le couvert forestier se reconstitue spontanément après ouverture [incendie ou coupe]. La FAO estime qu'au niveau mondial 54 % d'entre elles sont soumises à un plan de gestion à long terme, répertorié et examiné périodiquement, avec toutefois une grande variabilité selon les régions : 96 % en Europe, 59 % en Amérique du Nord, 24 % en Afrique et 19 % en Amérique du Sud. À l'heure actuelle, 1/3 des surfaces de forêts naturelle-

ment régénérées sont qualifiées de « primaires » par la FAO. Dans ces espaces, les activités humaines n'ont pas ou plus d'impact visible sur le fonctionnement de l'écosystème forestier. L'Union européenne considère que c'est le cas pour 2,2 % de ses forêts. En France, aucune ne peut prétendre à ce statut, mais une étude récente de l'unité de recherche LESSEM d'INRAE à Grenoble évalue à 3 % de la surface forestière nationale les forêts qui ne sont plus exploitées depuis 50 ans et plus.





Vue de la canopée guyanaise au sommet d'une tour à flux à 55 m de hauteur © INRAE - Christophe Maitre

CLIMAT

# Les forêts sont-elles toujours des puits de carbone ?

**Les forêts sont l'un des piliers du fonctionnement climatique global et elles contribuent à l'atténuation du changement climatique par leur rôle de puits de carbone via la photosynthèse et la formation de biomasse, notamment de bois.**

Leur capacité de stockage dépend de l'âge, de la santé des arbres, et aussi, dans les forêts gérées, des pratiques sylvicoles. Ainsi, une forêt peut devenir émettrice de carbone quand elle subit un stress environnemental important (canicule, attaque de ravageurs, etc.) ou une surexploitation. Actuellement, certaines régions forestières de l'hémisphère nord

stockent du carbone, tandis que certaines régions tropicales touchées par la déforestation ou dégradées en sont émettrices. C'est le cas de la forêt brésilienne<sup>1</sup> sur la dernière décennie (2010 - 2019), comme l'ont constaté les chercheurs d'INRAE, du CEA et de l'université d'Oklahoma.

**Les sols forestiers, des alliés à considérer**

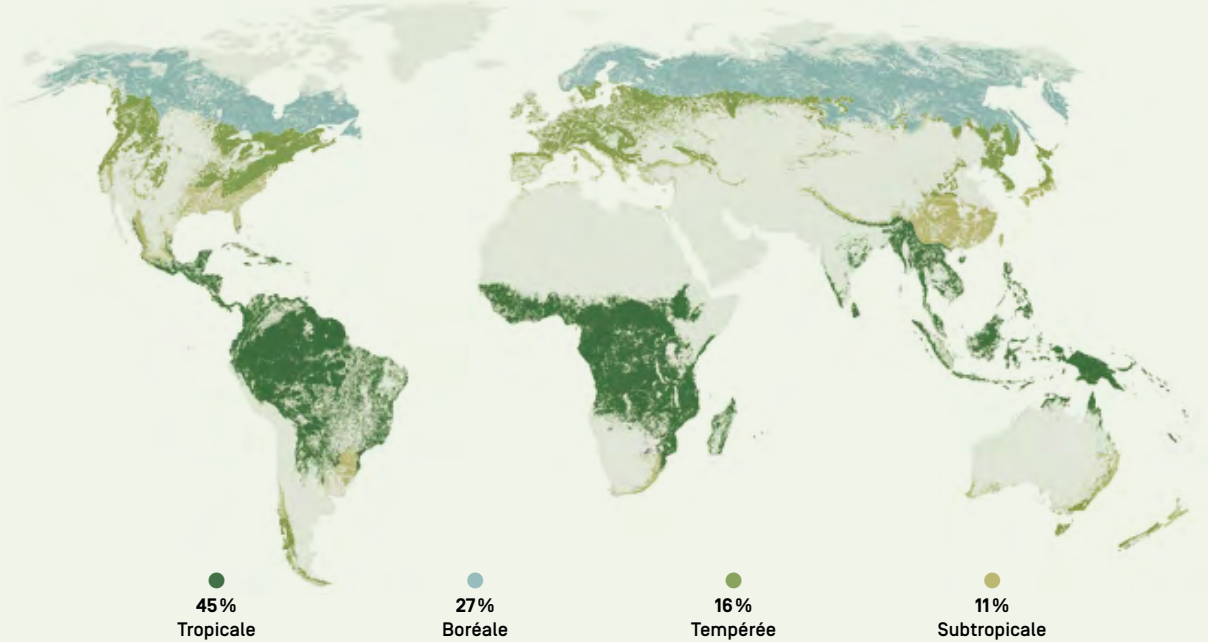
« Mais attention, le carbone atmosphérique est capté différemment selon les forêts, dans le bois<sup>2</sup> et dans les sols<sup>3</sup> ! », alerte le biogéochimiste Laurent Augusto de l'unité ISPA à Bordeaux. « Si une forêt tempérée stocke autant de carbone dans le bois que dans ses sols, la forêt tropicale a une dominante de captation dans ses arbres (56%), alors que la forêt boréale est plus active au niveau de ses sols (60% du carbone séquestré). » Cette capacité de séquestration évolue avec l'âge et la croissance des arbres. Elle passe par un maximum avant de diminuer. Les sols, eux, séquestrent très lentement le carbone sur des décennies et même des siècles. Ils peuvent être de précieux alliés dans la lutte contre le

réchauffement climatique s'ils sont correctement gérés. En effet, il s'agit d'éviter les perturbations (humaines ou naturelles) qui peuvent les amener à relarguer rapidement le carbone si lentement stocké. Ces éléments sont à intégrer dans les stratégies de gestion durable des forêts. « La bonne solution, pour optimiser ce rôle, est de raisonner le choix des espèces et des modes de sylviculture à l'échelle de la parcelle et du territoire », insiste Laurent Augusto. Capable de suivre, quasiment en temps réel, les variations de stockage de carbone atmosphérique par les forêts, la plateforme Biomass Carbon Monitor (voir Replay p. 90) élaborée avec le concours d'INRAE, permet depuis octobre 2021 d'éclairer gouvernements, ONG et professionnels sur cette question.

1. Qin Y. et al. 2021. Carbon losses from forest degradation exceed those from deforestation in the Brazilian Amazon during 2010-2019, Nature Climate Change.
2. Biomasse vivante (arbre, branche, feuille et racine), le bois mort est considéré à part.
3. Comprend l'ensemble des couches du sol dont la couche supérieure en décomposition (humus).

# ÉTAT DES LIEUX

## PROPORTION ET RÉPARTITION DE LA SUPERFICIE FORESTIÈRE MONDIALE PAR ZONE CLIMATIQUE, 2020



### ÉVOLUTION DES SURFACES FORESTIÈRES ENTRE 1990 ET 2020



### SURFACE OCCUPÉE PAR LES FORÊTS

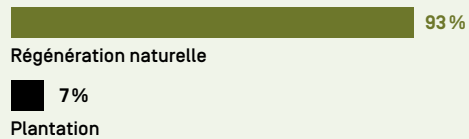
Monde  
**4,06 Mrds ha**



**5 pays**  
concentrent plus de la moitié des forêts

### TYPE DE GESTION

#### MONDE



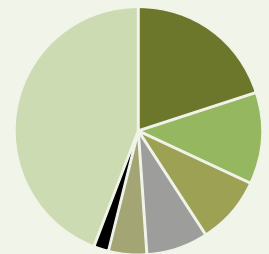
#### EUROPE



#### FRANCE



### RÉPARTITION DES FORÊTS



Sources : Évaluation des ressources forestières mondiales – 2020 (FAO), État des forêts européennes – 2020 (UNECE / FAO) Chiffres clés 2021 IGN, ONF, CNPF.



# NOS FORÊTS

## MISES À L'ÉPREUVE

Apparus il y a près de 370 millions d'années, les écosystèmes forestiers ont toujours été confrontés à de nombreuses perturbations naturelles d'origine météorologique ou causées par des organismes vivants. Face à ces aléas, accentués par les activités anthropiques, la résilience des forêts est aujourd'hui mise à l'épreuve.

### Explications.

Depuis toujours, l'aléa fait partie du cycle de vie des forêts. Dans certains cas, comme l'incendie ou la tempête, l'aléa offre même une opportunité de renouvellement grâce à l'accès à la lumière des individus précédemment dominés par les grands arbres, la germination de graines présentes dans le sol ou encore la fertilisation par les cendres... Avec le changement climatique, la dynamique des perturbations évolue. Trop fréquents, trop intenses, les aléas pourraient bien perturber les capacités naturelles des forêts à s'acclimater et à s'adapter. Une inquiétude née des modélisations des premiers rapports du GIEC (voir p.19) parus en 1988 et confortée aujourd'hui par l'observation des acteurs de terrain : propriétaires, gestionnaires et parfois simples citoyens.

#### Des observations manifestes

Été 2019, Lilian Duband, chargé de mission Changements climatiques, reconstitution et sylviculture à l'ONE, observe avec découragement la forêt de Verdun. « *C'est l'hécatombe, en l'espace de 3 ans, la totalité des peuplements d'épicéas, soit un cinquième de la forêt, est morte sur pied après 80 ans*

←  
Ce sapin pectiné desséché sur les pentes du Mont Ventoux illustre la difficulté de certaines espèces à faire face à l'évolution rapide du climat méditerranéen, et des aléas qui en découlent [sécheresses récurrentes, gel après hivers doux, parasitisme, etc.].

*de croissance sur des sols ayant pourtant souffert de bombardements. Outre la perte économique, c'est un vrai crève-cœur de voir du bois d'œuvre, qui aurait pu servir à construire des charpentes, tellement dégradé qu'il finit en palette.* » Au total, 1 500 hectares à abattre, et de multiples questions pour la suite : que peut-on planter ou favoriser si personne n'est sûr du climat, ni des ennemis à venir ? Loin d'être isolé, le problème est général dans l'hémisphère nord, en Europe (Allemagne, Autriche, Pologne, Slovaquie, Tchéquie), en Russie comme au Canada et aux États-Unis. Aucune région n'est épargnée.

#### Sécheresses, maladies, dégâts d'insectes...

À qui la faute ? Les responsables de ces mortalités exceptionnelles semblent tout trouvés : des petits coléoptères qui se développent sous les écorces, les scolytes, dont les populations s'orientent périodiquement à la hausse en France... Sauf que si pullulation il y a, elle n'est que la face émergée de l'iceberg. En réalité, c'est à un ensemble de circonstances climatiques cumulées que l'on doit cette situation préoccupante. Lothar et Martin →



© CC BY SA / Wikipedia – Tônu Pani

en 1999, Klaus en 2009... À chaque forte tempête qui s'abat sur les forêts européennes, les centaines de milliers d'hectares d'arbres cassés ou tombés offrent aux scolytes des habitats parfaits pour leur reproduction. Une température plus élevée stimule leur reproduction et accroît leur durée de vie: «1 degré de plus, c'est une génération de plus, soit 100 fois plus d'insectes», explique Hervé Jactel, entomologiste à l'UMR Biogeco à Bordeaux.

**« On estime qu'en 25 ans, les dépérissements ont été multipliés par cinq dans le monde entier, c'est énorme. »**

Michel Venetier

↑

D'une taille de 2 à 7 mm, les scolytes creusent des galeries larvaires sous l'écorce.

Ces coléoptères sont naturellement présents dans toutes les forêts du monde, beaucoup d'espèces sont spécifiques d'une essence.

### ... des aléas qui se combinent et se renforcent

Les aléas conjugués à la vulnérabilité des espèces affectent fortement la santé des forêts. « Habituellement, rappelle Nathalie Breda, écophysiologiste à l'UMR Silva à Nancy, *l'arbre fixe le carbone de l'atmosphère lors de la photosynthèse et l'utilise pour son processus de croissance. Il arrive ainsi à ralentir le développement d'une galerie d'insecte, ou il peut émettre des molécules odorantes par ses feuilles qui repoussent les ravageurs* », mais ces mécanismes de défense deviennent impossibles à activer pour les arbres déjà épuisés par trois périodes de sécheresse (2018, 2019 et 2020). « *L'arbre, quelle que soit l'espèce, peut réguler ses pertes en eau via la transpiration de ses feuilles et survivre plusieurs semaines sans pluie, poursuit Nathalie Breda, mais cela limite sa photosynthèse et l'oblige donc à puiser dans ses réserves.* » Lorsque la situation s'aggrave ou perdure plusieurs années, survient alors la mort de l'arbre jeune ou celle des feuilles et jeunes branches des arbres plus matures. D'autres organismes pathogènes endémiques profitent de cette situation. « *Certains champignons comme l'armillaire, qui se nourrit de bois en décomposition, accélèrent l'affaiblissement des arbres, voire provoquent leur mort* », explique Claude →

## UN CUMUL D'ALÉAS

### Les insectes, ravageurs forestiers

Les ravageurs forestiers attaquent les arbres en mangeant feuilles, racines et graines ou en se nourrissant sous l'écorce, perturbant ainsi la capacité des arbres à assimiler des nutriments, à assurer la photosynthèse ou à se reproduire. Ces attaques font partie d'interactions plantes-insectes courantes dans les écosystèmes et généralement tolérées par l'arbre. La mortalité survient après des attaques répétées de populations d'insectes dépassant un seuil d'équilibre, concomitantes à d'autres facteurs de stress comme les sécheresses ou quand ces insectes véhiculent des pathogènes (champignons, nématodes). Or, avec le réchauffement climatique, l'aire de répartition de certains ravageurs augmente et la fréquence et l'intensité des pullulations d'espèces indigènes mais aussi d'espèces exotiques envahissantes s'accroissent. Sur les 20 dernières années, 6 espèces d'insectes ravageurs<sup>1</sup> forestiers exotiques ont ainsi été introduites en moyenne par an, le plus souvent en lien avec les échanges commerciaux internationaux.

### Les maladies

Causées par des micro-organismes pathogènes, en particulier les champignons, les maladies peuvent affecter l'ensemble de l'arbre. Au fil de millénaires de coexistence et grâce au processus de coévolution, un équilibre s'est instauré entre les pathogènes indigènes et leurs hôtes, limitant les impacts des maladies. Mais face à l'affaiblissement de certains arbres, les pathogènes

peuvent prendre le dessus et entraîner leur mort. Les agents pathogènes exotiques sont les plus à craindre. Leur introduction, favorisée notamment par le commerce mondial, peut entraîner une mort rapide des arbres qui n'ont pas eu le temps de développer les mécanismes de défense appropriés.

### La canicule

La transpiration des feuilles *via* les stomates (leurs pores), permet de les maintenir à quelques degrés en dessous de la température de l'air. En l'absence de ce phénomène, elles s'échauffent. Quand les températures deviennent caniculaires, soit une température supérieure à 30-35°C le jour et 18-20 °C la nuit, la température des feuilles monte. À partir de 45 °C, parfois moins pour certaines espèces, elles « grillent ». Une température atteinte et dépassée durant l'été 2019 en Occitanie, et ailleurs en Europe.

### Les sécheresses édaphiques

Face au déficit prolongé de précipitations, les arbres sont capables de mobiliser par leurs racines l'eau disponible à de grandes profondeurs dans le sol. Lorsque celle-ci s'épuise (on parle alors de sécheresse édaphique), les arbres activent des mécanismes de régulation (fermeture des stomates) qui réduisent leur consommation en eau mais aussi leur photosynthèse et donc leur croissance. La récurrence de cet aléa plus tôt au printemps ou plus tard durant l'arrière saison impactent la physiologie des arbres et l'état sanitaire des forêts.

### Le vent & la tempête

Les épisodes de tempête en Europe sont trop rares pour qu'une tendance à la hausse ou à la baisse de leur récurrence ou de leur intensité à mesure que les températures se réchauffent soit décelable aujourd'hui. Si les tempêtes sont des chocs aux effets dévastateurs, le vent est lui un élément structurant pour l'arbre car il renforce son ancrage et stimule sa croissance. Jusqu'à un certain point : en prenant de l'âge et de la hauteur, les arbres deviennent plus sensibles à la force des vents et donc plus vulnérables aux tempêtes.

### L'engorgement

L'hiver, les sols se rechargent en eau. Au printemps, après des épisodes de fortes pluies, une nappe d'eau temporaire peut se former sur certains sols. Ceci réduit la disponibilité en oxygène pour les racines : on parle alors d'engorgement temporaire du sol, qui provoque l'anoxie des racines. Selon les espèces, l'intensité et la durée de cet aléa, la physiologie des arbres peut en être affectée. D'après les scénarios du GIEC, certaines régions d'Europe connaîtront un engorgement de leurs sols en raison d'hivers de plus en plus humides ou d'épisodes de pluies intenses, et ce en dépit des épisodes de sécheresses estivales.

1. Roques A. et al. 2020. Are invasive patterns of non-native insects related to woody plants differing between Europe and China ? - *Frontiers in Forests and Global Change*, 91.

## La course à l'adaptation

Pour faire face aux changements environnementaux qui ont jalonné l'histoire de la Terre, les espèces forestières ont emprunté deux voies non exclusives : l'adaptation aux nouvelles conditions locales et la migration vers des milieux plus propices.

### Migrer...

Repliés en Espagne, en Italie et dans les Balkans lors du dernier pic glaciaire il y a 18 000 ans, les chênes

blancs ont reconquis le nord de l'Europe, tout en se maintenant au sud<sup>1</sup>. « *S'adapter ou coloniser leur aire de répartition actuelle par dispersion naturelle des graines leur aura pris plusieurs siècles à raison de 400 m par an* », précise Antoine Kremer, généticien de l'UMR Biogeco à Pierroton. Ce rappel historique interroge : les arbres peuvent-ils migrer suffisamment vite pour suivre le changement climatique anticipé par les scénarios du GIEC ? Selon les modélisations du scénario (voir p. 19) « optimiste » (réchauffement de + 2 °C d'ici 2100), le chêne sessile aurait à se déplacer de 200 à 500 km vers l'Est pour suivre son climat de prédilection. Or, parmi les rares exemples de migration contemporaine observés<sup>2</sup>, l'aire du chêne vert s'est agrandie d'une dizaine de

mètres depuis la côte atlantique vers les terres au cours du dernier siècle. « *Si l'on considère ces données, les différences de grandeur sont telles que l'on peut dire que les espèces actuelles ne pourront pas suivre par migration naturelle la vitesse du changement du climat* », souligne le généticien.

### ...ou évoluer

Qu'en est-il de la vitesse d'adaptation alors ? Les résultats d'une analyse<sup>3</sup> du génome de chênes sessiles de trois forêts françaises, âgés de 12 à 300 ans et plus, montrent cependant que ceux-ci ont évolué rapidement, s'adaptant aux changements climatiques passés dans un temps relativement court... Par ailleurs, des phénomènes d'hybridation ont pu être observés en France, entre le chêne pédonculé et son cousin sessile, permettant à ce dernier de supporter un climat plus froid. L'enjeu deviendrait alors, pour assurer la pérennité de ces forêts de chênes par exemple, de les aider à s'acclimater avec une sylviculture favorisant la régénération naturelle et les contacts entre espèces tempérées et méditerranéennes.

←

Un bois fossilisé découvert dans l'étang de Thau (Sète). Le carottage et l'analyse de ce type de « macrorestes fossiles » participe à l'étude des migrations passées des arbres.



1. Brewer S. et al. 2002. The spread of deciduous *Quercus* throughout Europe since the last glacial period. *Forest Ecology and Management*, 156: 27-48.
2. Delzon S. et al. 2013. Field evidence of colonisation by holm oak, at the northern margin of its distribution range, during the anthropocene period. *PLoS ONE*, 8 (11).
3. Saleh D. et al. 2022. Genome-wide evolutionary response of European oaks during the Anthropocene. *Evolution Letters*, 6: 4-20.



© INRAE - Christophe Maître

Husson, expert du département Santé des forêts au ministère de l'Agriculture et de l'Alimentation. Et c'est sans compter les pathogènes invasifs responsables de maladies contre lesquelles certaines espèces d'arbres autochtones ne savent pas se défendre, comme par exemple *Hymenoscyphus fraxineus*, champignon pathogène responsable de la chalarose du frêne.

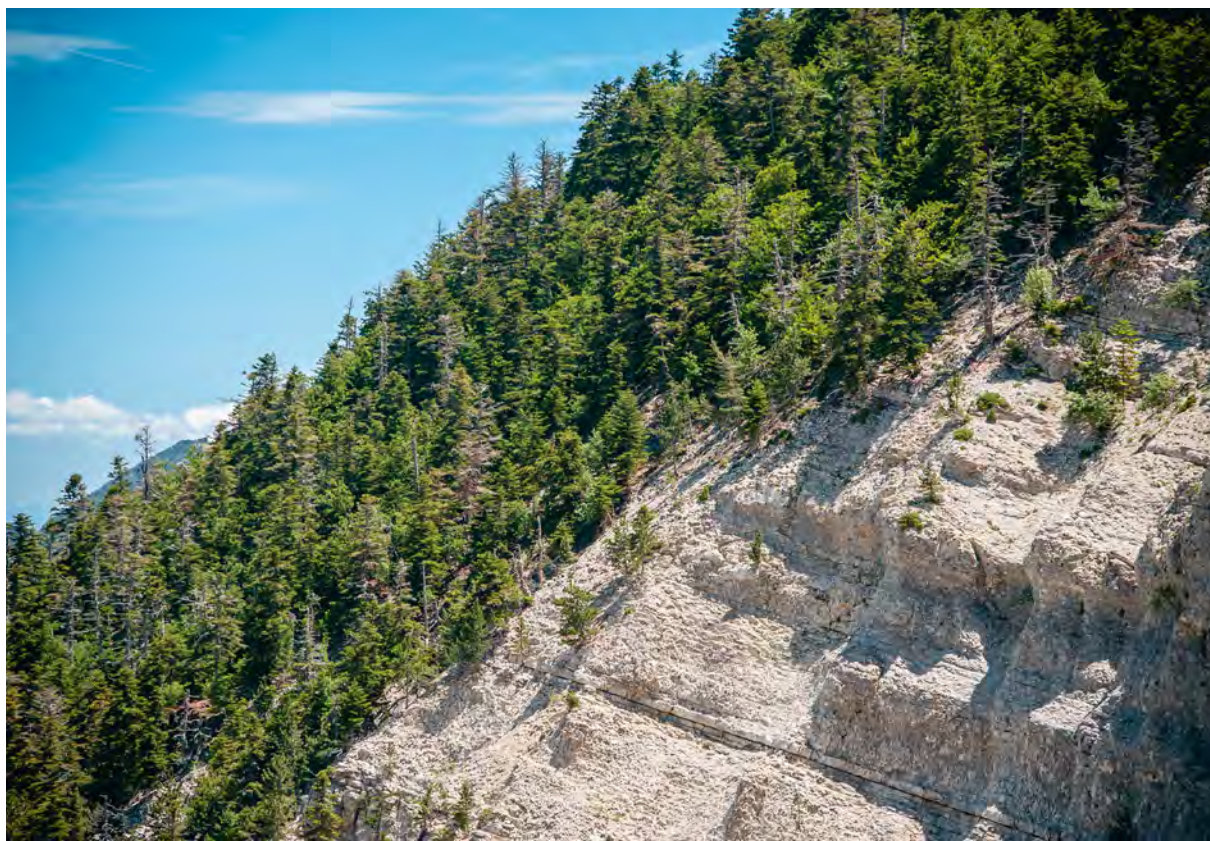
#### Un risque d'incendie accru par le dépérissement

Cette succession d'aléas stresse fortement les forêts et entraîne leur dépérissement (voir légende p. 80). « On estime qu'en 25 ans, les dépérissements ont été multipliés par 5 dans le monde entier, c'est énorme », insiste Michel Vennetier, ingénieur forestier retraité, dans le cadre des recherches menées à l'UMR Recover, à Aix-en-Provence, accroissant le risque pour les zones sujettes aux incendies en raison de la masse accrue de combustible (bois mort...). Des zones à risque qui s'étendent également avec le réchauffement climatique. Comme l'explique Thomas Curt, modélisateur du risque incendie à l'UMR Recover, « l'arrière-pays provençal et les zones de moyenne montagne

↑  
Le brûlage dirigé, encadré par l'État, consiste à détruire la végétation favorisant la propagation des incendies. Des lignes de mise à feu sont tracées, en descendant la pente et contre le vent. Le feu progresse par bandes montantes successives.

avoisinentes sont maintenant touchées. Les simulations montrent que l'Europe centrale et l'Europe de l'Est risquent de l'être de plus en plus ». Or, « lorsque la végétation, même vivante, est dans un tel état de dessèchement, le feu se propage de plus en plus vite et il est de plus en plus difficile de l'arrêter », poursuit Michel Vennetier. D'autre part, incendies et sécheresses répétés ne cumulent pas seulement leurs effets, ils les aggravent mutuellement, limitant la résilience des forêts. L'aléa ne doit donc plus être considéré comme unique, ponctuel, mais divers, →

**L'aléa ne doit donc plus être considéré comme unique, ponctuel, mais divers, répété, combiné, multiple.**



© INRAE - Bertrand Nicolas

répété, combiné, multiple. Le forestier Lilian Duband conclut : « Il faut faire le deuil de ce que pouvaient faire les forêts auparavant et diversifier les scénarios de gestion face aux futurs climats possibles. » Mélanger les espèces d'arbres, éclaircir ou rajeunir les peuplements, favoriser la diversité génétique, accélérer la migration naturelle, reboiser avec des essences adaptées... Des actions d'aménagement ont été mises au point (lire pages suivantes) et sont parfois appliquées depuis plusieurs années. Il faut maintenant les mettre en place à l'échelle du massif forestier en tenant compte de la vocation multifonctionnelle de chaque forêt. ●

↑

On qualifie de dépérissement l'affaiblissement progressif ou momentané d'une étendue boisée, pour laquelle on observe un ensemble de symptômes de dégradation durable des arbres tels que le jaunissement des feuilles, la réduction de la croissance, le

dessèchement ou des mortalités massives d'arbres, et qui ne peut être attribué à une seule cause.

Sur les pentes du Mont Ventoux on peut observer aisément ces différents stades provoqué par le changement climatique.

#### ÉQUILIBRE

## La question du renouvellement des forêts

**Les forêts se renouvellent spontanément, ou par plantation. L'installation de jeunes semis ou plants peut cependant être menacée par la présence en trop grand nombre d'ongulés [cerfs, chevreuils, sangliers].**

**Particulièrement friands des jeunes pousses, feuilles et bourgeons ou de l'écorce, cerfs et chevreuils exercent une forte pression de sélection sur les essences qu'ils apprécient (merisier, chêne, érable, tilleul, douglas...), compromettant l'adaptation de ces arbres au**

**changement climatique.**

**En fouillant le sol à la recherche de nourriture, les sangliers déterrent les jeunes semis, compromettant les opérations de plantations de production ou l'installation des espèces.**

**En France, les régions du Grand-Est, des Hauts de France et de Bourgogne Franche-Comté sont les plus concernées par ces surpopulations.**

**Le retour au bon équilibre « végétation-grande faune » à l'aide d'actions telles que le suivi des populations, l'aménagement forestier, la mise en place de protection ou la chasse, est un prérequis pour la réussite des solutions d'adaptation pour les massifs concernés.**

# ADAPTATION, DES PISTES D'ACTION

Les changements globaux actuels sont inédits à l'échelle humaine tant en termes de rapidité que d'intensité. Ils rendent incertain l'avenir des forêts telles que nous les connaissons. Afin d'aider les décideurs publics, professionnels et propriétaires à faire face aux risques accrus, INRAE expérimente depuis plusieurs décennies des modes de gestion durable, en partenariat avec de nombreux acteurs publics et privés.

**Retour sur 4 expérimentations majeures.**

## LE MÉLANGE DES ESPÈCES

**Face à la diversité des aléas et à leur combinaison, les forêts ou plantations mélangées sont plébiscitées. Le mélange des essences serait-il la panacée ?**

C'est avéré, les forêts et plantations en mélange présentent en moyenne une plus grande résilience face aux attaques d'insectes, de champignons et d'autres bioagresseurs. Pour la réponse aux aléas climatiques, les conclusions sont moins tranchées. Si les scientifiques observent qu'elles résistent mieux aux vents forts, le mélange n'apporte pas toujours une aide en cas de manque d'eau. Il semble néanmoins préférable de favoriser des forêts et plantations pluri-espèces, si possible complémentaires sur le plan écologique (des développements racinaires différents ou une demande en eau décalée durant la feuillaison ou la floraison...) et compatibles en matière de gestion sylvicole. Il faut aussi tenir compte des

impacts potentiels sur la biodiversité et sur les services écosystémiques. Ainsi, et de manière contre-intuitive, certaines espèces animales ou végétales se développant dans les peuplements purs (comportant une seule espèce d'arbre) sont absentes des forêts mélangées<sup>1</sup>. Il convient donc de diversifier la gestion avec des forêts pures, mélangées et d'autres non gérées.

**Des associations à privilégier**

Pour les forêts mélangées, ce n'est pas tant le nombre d'espèces présentes que la composition →

**Pour les forêts mélangées, ce n'est pas tant le nombre d'espèces présentes que leur identité qui importe pour leur résilience.**

1. Korboulewsky N. et al. 2016. How tree diversity affects soil fauna diversity: a review. *Soil Biology and Biochemistry*, 94: 94-106.



© INRAE - Bertrand Nicolas

qui importe pour leur résilience. De ce point de vue, les associations de feuillus et de conifères sont particulièrement intéressantes. Des essais sont en cours, notamment dans les dispositifs **OPTMix** en région Val de Loire et **ORPHEE** en Nouvelle Aquitaine, avec l'observation en parcelles pures ou en mélange de plusieurs espèces d'intérêt<sup>2</sup> pour la filière. Les effets du climat, de la gestion sylvicole (mélange et densité) et des grands herbivores sur le fonctionnement des forêts mélangées de plaine sont abordés. À l'échelle européenne, le projet **FunDivEurope** (consortium de 29 instituts, dont INRAE) a évalué les services environnementaux rendus par plus de 200 forêts au sein de 6 pays aux climats différents (Finlande, Pologne, Allemagne, Roumanie, Italie et Espagne). La conclusion est sans appel : plus les forêts sont diversifiées en essences, plus elles rendent de services (épuration de l'eau, préservation du sol, etc.). Des études de même nature se poursuivent à travers le monde jusqu'en 2024 sur près d'1,2 millions d'arbres de 26 forêts plantées plus ou moins intensivement en mélange, dans le cadre du projet **MixForChange**. Pour sa part, le projet **I-Mastro** évalue depuis deux ans dans 4 pays d'Europe (Pologne, Slovénie, Allemagne, France) en quoi la diversification des forêts favorise leur résilience face aux perturbations climatiques. Réponse attendue fin 2022.

↑  
Mesures de diamètre des arbres d'une chênaie en Val de Loire. Ce relevé, dit dendrométrique, permet d'évaluer la dynamique de croissance de la forêt selon son contexte : sol, climat, densité du peuplement, mélange, présence d'ongulés, fréquence des coupes d'éclaircie...

2. OPTMix : chêne sessile et pin sylvestre / ORPHEE : bouleau, chêne des Pyrénées, chêne pédonculé, chêne vert, pin maritime

## LA DIVERSITÉ GÉNÉTIQUE

**Génétiquement, deux arbres voisins au sein d'une même forêt présentent en moyenne dix fois plus de diversité que deux êtres humains séparés par des milliers de kilomètres depuis des millénaires. Cette diversité génétique remarquable, présente chez la plupart des espèces d'arbres forestiers, fournit en quelque sorte le « carburant » de l'évolution dont la sélection naturelle est le « moteur ».**

Les chercheurs ont montré qu'il existait autant de diversité génétique au sein d'une population d'arbres qu'entre celles vivant dans des lieux très différents. La dynamique de cette diversité, alimentée à chaque génération par des mutations et le brassage de l'information génétique lors de la reproduction, se produit sur des pas de temps longs. Or, la rapidité du changement climatique en cours – à l'échelle d'une seule génération d'arbres – pose la question du maintien sur le long terme de cette véritable « assurance de survie » qu'est la diversité génétique. C'est sur elle que les forestiers peuvent compter pour adapter les forêts lors de leur renouvellement et pour créer des variétés nouvelles, à fort potentiel d'adaptation ou d'intérêt pour la bioéconomie. Il est donc indispensable de mettre en œuvre des méthodes de conservation voire d'enrichissement de ce capital qui n'est pas illimité, de bien le gérer par la mise en place de pratiques

**Il est indispensable de mettre en œuvre des méthodes de conservation voire d'enrichissement du capital génétique des forêts.**

de gestion sylvicole dites « adaptatives », voire de le restaurer lorsqu'il a été dégradé. Le projet européen **GenTree** (H2020, 2016-2020, 22 partenaires) coordonné par INRAE, a permis de mieux connaître la répartition de cette diversité génétique pour 12 espèces autochtones, présentes dans toute l'Europe et d'intérêt pour la filière, dont les pins maritime et sylvestre, l'épicéa commun, le chêne sessile et le hêtre. L'analyse des données obtenues sur 4 750 arbres situés dans plus de 200 forêts naturelles, ont permis d'identifier les forêts où la diversité génétique doit être conservée et les pratiques qui la favorise, une aide précieuse pour élaborer les stratégies européennes en faveur de la biodiversité et des forêts à l'horizon 2030. En complément, le projet européen **B4EST** (H2020 2018-2022, 19 partenaires), étudie les bases génétiques de la réponse des arbres au climat, l'intérêt de la diversité génétique en sélection et de la diversification de l'offre en variétés pour anticiper les besoins de demain pour 8 espèces économiquement majeures.

↓  
Sur les pentes du Mont Ventoux à 1400 mètres d'altitude, un technicien prélève une branche au sommet d'un sapin. Cet échantillon permettra de mesurer au laboratoire le potentiel hydrique de l'arbre.

3. La provenance qualifie l'origine géographique d'une essence d'arbre. C'est une zone caractérisée par des conditions écologiques auxquelles les arbres se sont adaptés et ont développé des caractéristiques génétiques similaires (source : *onf.fr*).

## LA MIGRATION ASSISTÉE

**Accélérer la migration naturelle en favorisant ou en implantant des arbres mieux adaptés aux conditions pédoclimatiques futures.**

Par cette stratégie, forestiers et chercheurs tentent de prendre de l'avance. L'idée est d'accompagner la migration d'espèces ou de provenances<sup>3</sup> d'arbres au-delà de leur aire de distribution actuelle en un lieu, souvent plus septentrional ou d'altitude plus élevée, où les résultats des projections climatiques à l'échéance de plusieurs décennies anticipent les conditions de leur niche actuelle.

### Un écosystème entier à prendre en compte

Mais ce déplacement, principalement envisagé comme support pour l'adaptation à la sécheresse et aux canicules, implique de considérer l'évolution de l'écosystème forestier dans toute sa complexité : la biodiversité qu'il abrite et qu'il convient de préserver, le sol ou encore les services, environnementaux, économiques ou sociaux, qu'il assure. La migration assistée est déjà une réalité en cours d'évaluation. Cette pratique concerne environ 30 % des plants installés par l'ONF en région Grand Est durant l'hiver 2021-2022.

### Des essences à l'étude

Depuis 4 ans, les forestiers sont autorisés par dérogation à expérimenter le remplacement de certaines essences en difficulté dans le Nord-Est par leurs cousines méridionales. →

**La « migration assistée » implique de considérer l'évolution de l'écosystème forestier dans toute sa complexité.**



© INRAE - Bertrand Nicolas



© INRAE - Bertrand Nicolas

C'est le cas par exemple du chêne pubescent et du pin maritime qui pourraient remplacer progressivement le chêne sessile et le pin sylvestre. Parmi les récents projets emblématiques dont INRAE est partenaire, **REN-Essences** (coordination ONF) et **Esperense** (coordination RMT AFORCE) visent à identifier et tester de nouvelles essences ou provenances moins connues, comme le pin de Brutie (Turquie) ou le chêne de Hongrie (Bulgarie), à la fois résilientes, productives et assurant des services écosystémiques équivalents dans différentes régions exposées au changement climatique. Les premières essences candidates devraient être identifiées d'ici 5 à 8 ans. À long terme, ces premiers « îlots d'avenir » pourraient représenter les seules ressources en graines de ces espèces candidates, pour certaines en mauvaise posture aujourd'hui dans leur aire naturelle.

↑  
Plantation expérimentale permettant d'étudier l'impact et l'adaptation au changement d'altitude pour les essences d'arbres présentes sur le Mont Ventoux.

## UNE SYLVICULTURE PLUS DYNAMIQUE

**La gestion des forêts est rythmée par l'évolution des arbres, de la phase de renouvellement à la récolte, entre 50 à 200 ans en fonction des essences forestières. Plus les forêts vieillissent, plus les aléas, notamment météorologiques, peuvent avoir des impacts environnementaux et économiques importants.**

La pratique d'éclaircie des peuplements a fait ses preuves dans la plupart des forêts du monde et pour quasiment toutes les espèces, pour atténuer l'impact d'un déficit en eau dans le sol, limiter le dépérissement et favoriser une reprise de la croissance après sécheresse : moins d'arbres à l'hectare, c'est moins de surface foliaire, moins d'évapotranspiration, moins d'interception des précipitations, moins de compétition. Rajeunir la forêt et accélérer le renouvellement des générations fait également partie des leviers identifiés : les arbres jeunes sont plus résistants à la sécheresse – mais plus vulnérables à l'incendie (épaisseur d'écorce et hauteur du houppier réduites) ou au gel, et ont un potentiel d'acclimatation morphologique et anatomique au climat actuel supérieur aux arbres plus âgés. Réduire la révolution, soit le nombre d'années avant la récolte finale, permet

**Rajeunir la forêt et accélérer le renouvellement des générations fait également partie des leviers identifiés.**

d'écourter la période d'exposition aux aléas climatiques des arbres trop âgés, plus vulnérables. Une régénération continue ou accélérée favorise en plus la sélection plus rapide des gènes les mieux adaptés au climat changeant.

### Doser les interventions

Bien entendu, ces pratiques sylvicoles qui visent prioritairement une meilleure résilience des forêts de production doivent être adaptées pour combiner services d'approvisionnement et services supports (modalités d'intervention pour préserver la qualité des sols, maintien de vieux arbres et de bois mort en forêt pour conserver la biodiversité, etc.). Dans certaines forêts où les enjeux environnementaux en matière, par exemple, de séquestration de carbone ou de biodiversité priment, tels que les réserves, les territoires forestiers historiques d'avant 1850, les îlots non gérés dits de sénescence, etc., d'autres options sylvicoles doivent être privilégiées. Dans ces zones protégées, l'intervention ne doit se faire qu'en ultime recours pour conserver un état boisé ou des espèces végétales dont dépendent des espèces animales protégées...

↓  
Coupe d'arbres malades dangereux pour le public. Dans certains cas, les restes de coupe (tronc, branches...) sont laissés sur place pour favoriser la biodiversité.

### ACCOMPAGNEMENT TECHNIQUE

## Réussir le renouvellement

Le site internet [climessences.fr](http://climessences.fr), fruit d'un travail multipartenarial dans le cadre du RMT AFORCE, compile les données de 10 années de recherches pour accompagner le choix des essences forestières en contexte de climat changeant. Depuis 2021, il permet d'analyser le niveau de risques d'implantation de près de 150 espèces européennes (110 résineux, 37 feuillus) en France, selon deux scénarios climatiques pour 2100, l'un optimiste [réchauffement de + 2 °C], l'autre pessimiste [+ 4 à 5 °C].

Ces éléments peuvent autant alimenter la réflexion des propriétaires et gestionnaires à l'échelle d'une parcelle que celle des services de l'État et collectivités à l'échelle d'un massif ou d'un territoire.

En parallèle, INRAE, AgroParisTech et l'ONF ont lancé en 2017 le pôle d'innovation RENFOR qui accompagne les praticiens forestiers confrontés à des difficultés pour renouveler leurs forêts, par régénération naturelle ou par plantation. Le pôle conçoit des itinéraires sylvicoles de renouvellement et évalue leurs performances économiques, environnementales et sociales. Il propose des méthodes pour limiter la mortalité initiale des arbres en plantation souvent due aux sécheresses estivales, ou pour réduire l'envahissement des parcelles en régénération spontanée par la fougère aigle. Il conçoit également des outils de plantation réduisant la pénibilité du travail et des procédés cultureux limitant les dégâts causés par les ongulés. Enfin, avec plus de 4 000 ha de forêts dévolus à l'expérimentation en gestion forestière, l'infrastructure nationale IN-SYLVA-France, coordonnée par INRAE, regroupe les dispositifs de recherche des établissements travaillant sur la gestion forestière. Les expérimentations sur plusieurs sites couplent les leviers sylvicoles, biogéochimiques et génétiques pour favoriser une vision intégrée de la sylviculture et élaborer une gestion adaptative et durable.



# QUELLES POLITIQUES PUBLIQUES POUR DES FORÊTS PRIVÉES ?

À l'échelle du monde, l'Europe fait figure d'exception :  
60 % des forêts sont privées contre seulement 30 %  
en Amérique et en Asie. Plus encore, ce taux atteint 75 %  
en France. Alors que la forêt est au cœur de multiples enjeux,  
cette donnée est déterminante pour la réussite des politiques  
publiques de gestion de ces socio-écosystèmes.

**Tour d'horizon de la situation française.**



À l'aune du changement climatique, les forêts sont redevenues stratégiques pour les États, comme en témoignent la Stratégie nationale bas-carbone française (SNBC), la feuille de route pour l'adaptation des forêts métropolitaines françaises au changement climatique<sup>1</sup> élaborée en 2020 par les acteurs de la forêt et du bois à la demande du ministère de l'Agriculture et de l'Alimentation, ou bien encore la toute nouvelle stratégie forestière européenne (2021). Les documents d'orientation insistent sur la nécessité de renforcer les capacités de stockage de carbone en redynamisant les récoltes de bois pour des usages à long terme (constructions à ossature bois, charpentes, parquets...), tout en préservant les services écosystémiques. La feuille de route liste les actions opérationnelles à mettre en œuvre d'ici 2050. Comment mobiliser les propriétaires forestiers autour de ces enjeux nationaux ?

#### Une temporalité de gestion à revoir face à l'incertitude

« Les propriétaires sont bien conscients du changement climatique, certains observent déjà son impact sur leurs forêts, observe Julie Thomas, ingénieure en socio-économie au CNPF, mais 84 % d'entre eux n'ont pas modifié leurs pratiques sylvicoles, ou n'envisagent pas de le faire d'ici 5 ans. » C'est l'un des résultats de l'enquête **MACCLIF** menée entre 2017 et 2019 sur la perception du changement climatique par les forestiers (922 professionnels de la filière forêt-bois et 960 propriétaires consultés) pour identifier les freins à l'adoption de nouvelles pratiques de gestion. Pourquoi une telle inertie ? « Ils ont, pour un très grand nombre, le sentiment de manquer d'informations précises, ou d'en recevoir de contradictoires, et dans le doute, ils préfèrent rester sur les pratiques qu'ils connaissent et qu'ils maîtrisent », reprend Julie Thomas.

À l'opposé, 78 % des gestionnaires interrogés, publics ou privés, expliquent avoir déjà modifié leurs pratiques sylvicoles, leurs conseils aux propriétaires ou encore leurs plans de gestion. Certains privilégient une technicité et une technologie sylvicole plus intensives pour échapper à l'aléa (choix d'essences à croissance rapide, raccourcissement des cycles avec des coupes plus précoces et donc plus fréquentes, standardisation de la production pour utiliser des bois plus jeunes). D'autres choisissent de rendre les peuplements

#### Forêts, publiques ou privées ?



**73 %**  
des forêts  
mondiales  
majoritairement  
publiques

#### AMÉRIQUE DU NORD (USA + Canada)

**68 %**  
publiques

RUSSIE  
**100 %**  
publiques

#### AMÉRIQUE DU SUD

**64 %**  
publiques

ASIE  
**≈ 64-67 %**  
publiques

#### Et dans l'Union européenne ?

PAYS NORDIQUES  
**≈ 70-90 %**  
privées

PAYS DE L'EST  
**≈ 30 %**  
privées

ALLEMAGNE  
**50 %**  
privées

FRANCE  
**75 %**  
privées

Source : FAO FRA 2015  
et 2020, UNECE  
FACESMAP 2016, IGN.

plus résilients aux aléas en accompagnant les processus naturels (diversification des essences, préparation d'une régénération sous un peuplement mature, etc.). Philippe Deuffic, sociologue de l'unité ETTIS à Bordeaux, précise : « Depuis 30 ans, on observe une écologisation des pratiques sylvicoles, sous la pression des associations environnementales et du public, mais aussi par intérêt des forestiers pour ces questions. Certaines pratiques, auparavant jugées économiquement coûteuses et inutiles à la production sont aujourd'hui réhabilitées : conserver des feuillus sous un peuplement de résineux, conserver des arbres morts ou vieillissants... » Quelle décision prendre cependant alors que l'on ne pourra en voir les effets que bien plus tard ? Ainsi, les actions déjà en place dans les forêts publiques (voir article précédent) ne pourront être évaluées que dans plusieurs décennies. Ceci peut inquiéter certains gestionnaires qui n'ont plus le temps d'analyser la pertinence de leurs choix entre deux aléas. Réinventer une sylviculture<sup>2</sup> pourrait alors passer par une nouvelle temporalité avec des suivis de gestion tous les 5 ans et non des plans figés pour 20 ans. Cette gestion « adaptative » permettrait de corriger la direction donnée si nécessaire.

Une piste prometteuse identifiée parmi les facteurs déterminants de changement de pratiques pour les propriétaires : la possession d'un document de gestion durable est dans le tiercé gagnant avec la taille de la surface possédée et l'intérêt porté à sa forêt. →

## Réinventer une sylviculture pourrait passer par une nouvelle temporalité avec des suivis de gestion tous les 5 ans et non des plans figés pour 20 ans.

### Assurer les forêts, un levier pour une sylviculture durable

« L'assurance est l'une des stratégies d'adaptation "douce" préconisée par la Banque mondiale, explique Marielle Brunette, économiste à l'UMR BETA à Nancy, car elle aide le propriétaire à couvrir les frais de reboisement en cas de problème. » Assurer sa forêt face aux dégâts causés par des aléas permettrait ainsi de garantir qu'une zone donnée reste forestière. Or, en France, seulement 5 % des forêts privées sont assurées. Si la situation est similaire chez nos voisins allemands, elle est très différente dans les pays nordiques comme le Danemark, où près de 50 % des forêts privées sont assurées. Il est difficile de savoir si ce faible taux est lié au manque d'information, à une offre inadaptée (seuls 3 opérateurs assurent uniquement les risques tempêtes/incendies) ou au fait que la majorité des propriétaires possède de petites surfaces (2 des 3,5 millions de propriétaires français possèdent moins d'un hectare de forêt). Les contrats d'assurance pourraient englober des clauses d'encouragement des pratiques de gestion durable par « une indemnité plus importante en cas de dommages selon l'effort de gestion fourni, comme le recours au mélange d'espèces, à des travaux d'éclaircies plutôt que de coupe rase, à des cycles de récoltes plus courts dans les situations les plus à risques », conclut Marielle Brunette.

Face aux problématiques de risques nouveaux (sécheresse), dépendants (sécheresse et incendie) et en cascade (sécheresse et parasites), l'UMR BETA développe depuis quelques années des modèles d'assurance qui intéressent les assureurs. Dans sa thèse<sup>3</sup>, Sandrine Brêteau-Amores propose ainsi un nouveau modèle d'assurance

## Les contrats d'assurance pourraient englober des clauses d'encouragement des pratiques de gestion durable.

1. [agriculture.gouv.fr/francelerance-adapter-les-forets-au-changement-climatique](http://agriculture.gouv.fr/francelerance-adapter-les-forets-au-changement-climatique)

2. Filière bois-forêts du Ballon des Vosges : Perceptions du changement climatique chez les gestionnaires forestiers (Afforball) : [url.inrae.fr/3t1YwhD](http://url.inrae.fr/3t1YwhD)

3. Brêteau-Amores S. 2020. Analyse économique des stratégies d'adaptation face au risque de dépérissement induit par la sécheresse en forêt : [bilan financier et/ou bilan carbone](#). Thèse, université de Lorraine.

4. Le réseau Natura 2000 vise à conserver la biodiversité d'un ensemble de sites naturels de l'UE. Chaque État membre est tenu d'identifier des sites et d'adapter cette démarche à son propre contexte socio-économique. La France incite les propriétaires (forestiers comme agriculteurs) à déployer des modes de gestion respectueux de l'environnement via un contrat volontaire avec une rémunération compensatoire.

5. Enquêtes Agreste 2012 (ministère de l'Agriculture) et Résofop 2015 (CNPF).

forestière basé sur l'observation d'un indice météorologique – on parle d'assurance indicielle ou paramétrique – pour le risque de sécheresse extrême, en l'adaptant du secteur agricole à la forêt. Les propriétaires seraient ainsi indemnisés dès lors que l'indice dépasse un certain seuil préalablement défini.

### Rémunérer les services environnementaux et sociaux

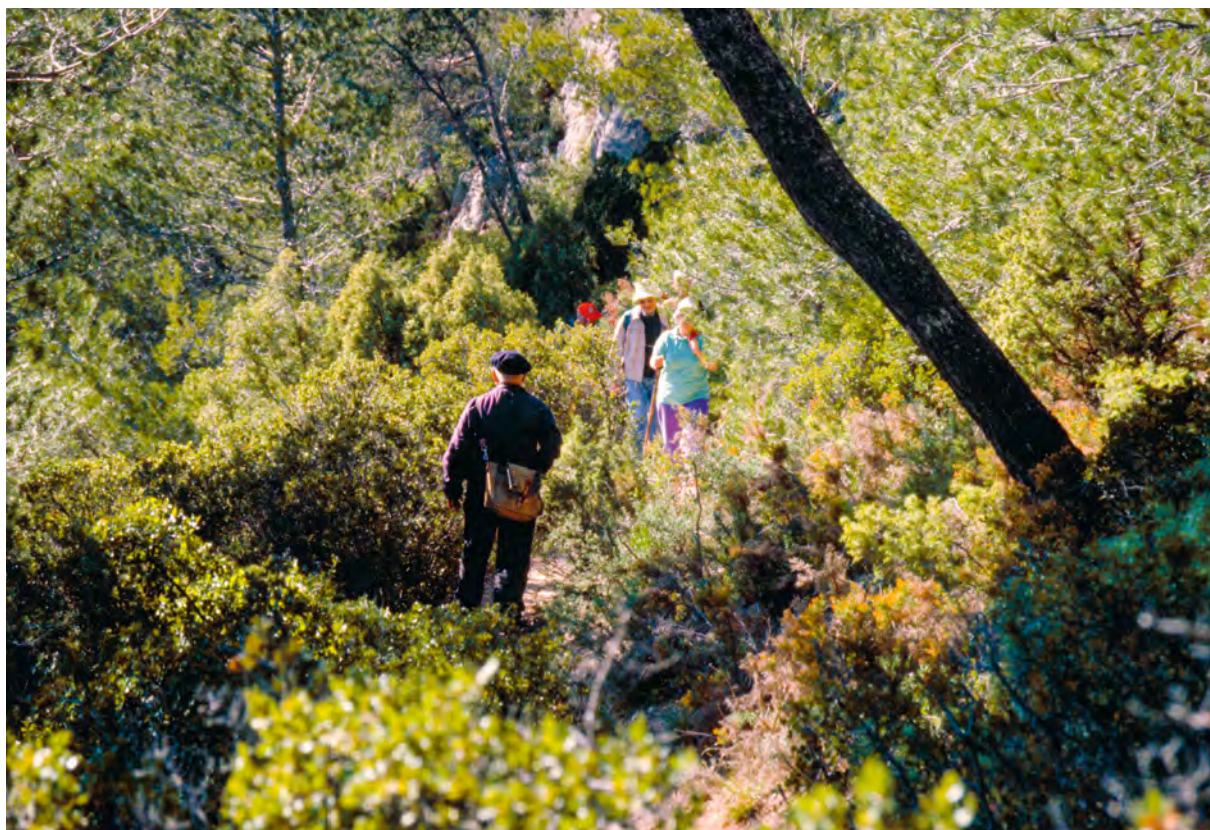
Afin de préserver les services sociaux ou environnementaux des forêts privées, on peut avoir recours, en plus des réglementations, à leur rémunération directe *via* des licences ou des paiements pour services environnementaux (PSE). En France et dans le monde, les PSE permettent d'inciter les propriétaires à mettre en place des mesures spécifiques dans leur forêt en faveur d'un ou plusieurs services (purification de l'eau, régulation du climat par la séquestration du carbone, activités récréatives...) ou pour la préservation de la biodiversité. Jens Abildtrup, économiste à l'UMR BETA à Nancy, donne quelques exemples : « En Italie du Nord, les amoureux des champignons payent pour ramasser des truffes. Au Danemark, les cavaliers sont soumis à une licence qui finance l'entretien des chemins. Quant au Canada, le ticket de parking fait office de billet d'entrée. » Il ajoute qu'« en France, les chasseurs payent déjà un droit de bail pour exercer leurs activités sur des propriétés privées d'une certaine superficie ». « Dans certains cas, on observe que cela produit des résultats », déclare Serge Garcia, économiste à l'UMR BETA à Nancy. Mais attention, pour être efficace, « le PSE doit respecter certaines conditions, notamment la rémunération doit être délivrée en échange d'une action spécifique du propriétaire », précise-t-il. Ainsi, en application de la directive européenne habitats Faune-Flore, les contrats Natura 2000<sup>4</sup> proposent une rémunération compensatoire aux propriétaires privés et publics qui s'engagent à des pratiques de préservation de la biodiversité au-delà de ce que prévoit la réglementation. Ils reçoivent une compensation du manque à gagner ou du surcoût entraîné par l'opération sylvicole réalisée. Cependant, seulement 25 % des forêts privées en font l'objet, contre 38 % des forêts publiques, probablement parce que cette rémunération n'est pas assez incitative au regard des coûts réels de l'opération, parfois décalés dans le temps.

### Inciter et accompagner

Comme on l'a vu, malgré 29 ans d'existence, peu de propriétaires forestiers privés se sont engagés dans la politique européenne Natura 2000 de conservation de la biodiversité. Au-delà de la question de la meilleure évaluation des coûts et de la compensation accordée, le frein réside parfois dans la crainte des propriétaires de perdre la souveraineté sur leur forêt. Ceci incite à aller au-delà de la seule compensation financière en se demandant quelles sont les autres motivations à actionner pour faire évoluer les pratiques sylvicoles. « *Leur attachement* », répond Marieke Blondet, anthropologue à l'UMR Silva à Nancy. En effet, ce lien affectif arrive systématiquement en tête (66% des sondés) lors des enquêtes<sup>5</sup> auprès des concernés sur leurs attentes ou intérêts vis-à-vis de leurs forêts, et ce quelle que soit la surface possédée ou le profil social des répondants. La production de bois pour la vente ou leur propre consommation n'arrive qu'en troisième ou quatrième position (45% des sondés). « *La valeur qu'attribuent les propriétaires à leur forêt est liée à leur vécu, parfois à celui des générations précédentes, et au désir*

↓  
En 2019, les 3/4 des promeneurs français interrogés, dans le cadre du rapport EFESE, déclarent que « visiter la forêt était le seul but de leur sortie ».

*de transmettre une "belle forêt" à leurs descendants, dans le meilleur état de conservation possible* », poursuit Marieke Blondet. À ces constats, le rapport final du projet AMII (2014-2017, coordination F. de Morogues, FCBA), auquel la chercheuse a contribué, recommande de mieux prendre en compte la diversité des motivations pour proposer un panel d'incitations : confier la contractualisation aux « professionnels de la forêt » (ONF, CNPF ou une association de protection de l'environnement) ; coordonner en amont ces organismes afin de compiler un ensemble d'actions (gestion durable, certification, protection de la biodiversité...) qui pourraient faire l'objet de l'engagement des propriétaires, soit individuellement, soit collectivement avec ces organismes ; proposer des contrats « rachetables » libérant les héritiers du propriétaire de toutes contraintes liées à la gestion de la forêt. Enfin, créer des concours valorisant la « bonne gestion forestière » ou l'aspect remarquable d'une forêt pourrait donner du sens à ces actions, à l'image du concours « prairies fleuries » qui récompense une gestion favorisant la biodiversité dans le monde agricole. ●



## REPLAY

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

10 . 12 . 21

BIOÉCONOMIE

# LA VALORISATION DES DÉCHETS À L'HONNEUR

Nathalie Gontard, directrice de recherche à INRAE, reçoit un trophée des Étoiles de l'Europe, mention science ouverte pour le **projet européen NoAw** (*No Agriculture Waste*) qu'elle coordonne depuis 2016. Réunissant 32 partenaires académiques et industriels d'une douzaine de pays, le projet travaillait sur la réduction et la valorisation des déchets agricoles et alimentaires.

50 publications scientifiques, de nombreux prototypes en sont issus avec des approches innovantes telles que éco-convertir les résidus agricoles inévitables et inutilisés (sarments, paille, fumier, etc.) en bioproduits (bioénergies, bioplastiques, etc.). Un grand équipementier a investi récemment pour l'industrialisation d'un procédé développé dans une ferme pilote en Italie.



© MESRI

11 . 10 . 21 DÉV. DURABLE

## RSE : INRAE S'ENGAGE

Ces derniers mois INRAE a consolidé son engagement en faveur du développement durable en déployant sa stratégie de Responsabilité sociétale des entreprises (RSE). Il s'est traduit notamment par un premier plan d'actions RSE (2021-2025) en 70 actions. L'enjeu est de mettre en cohérence les valeurs, les programmes de recherche et les pratiques d'INRAE, pour définir une trajectoire bas carbone visant la neutralité et affirmer une politique sociale porteuse de sens et favorable à la qualité de vie au travail. Parmi les projets retenus, un plan biodiversité pour ses 150 implantations, le développement du Système de management environnemental SME dans les unités, des plans de mobilité durable par centre, de rénovation énergétique des bâtiments, etc.

10 . 01 . 22

EUROPE



Le programme ERC (Conseil européen de la recherche), qui finance l'excellence scientifique à la frontière des connaissances, a accordé deux bourses à de jeunes chercheuses INRAE. Avec son projet, HoloE<sup>2</sup>Plant, Claudia Bartoli, vise, grâce à la microbiologie à haut-débit, à isoler et caractériser rapidement des microorganismes adaptés aux plantes, et étudier les mécanismes co-évolutifs entre le microbiote et son hôte. Grâce à une nouvelle technologie d'imagerie à super résolution qu'elle a mise au point, Kalina Haas veut étudier avec le projet STORMtheWALL le mécanisme utilisé par les plantes pour étendre leurs parois cellulaires pendant leur croissance.

06.01.22

CLIMAT



© INRAE - Corine Enard

### Aider les chênes à s'adapter

Couper plus tôt les arbres puis favoriser la régénération naturelle des forêts pourrait faciliter l'adaptation de celles-ci à l'accélération du réchauffement climatique. C'est une des conclusions de l'étude génétique, menée sur plus de 600 chênes de trois forêts françaises sur les trois derniers siècles, par INRAE, l'ONF, le CEA et les universités d'Uppsala (Suède) et Zhejiang (Chine).

23.12.21

AGROÉCOLOGIE

## Expérimentation grandeur mondiale

L'approche « **On-Farm Experimentation** » (OFE) propose de nouvelles façons d'innover en agriculture, en partant du terrain et des questions et savoirs des agriculteurs. Plus de 30 000 exploitations dans le monde ont déjà initié cette démarche, qu'une équipe internationale de recherche, impliquant 8 pays, dont la France avec l'institut #DigitAg et INRAE, se propose de formaliser et de faire reconnaître. Cette équipe a posé les principes fondateurs du modèle OFE, basé sur l'expérimentation co-construite en local et l'extrapolation des enseignements à d'autres contextes pour accélérer la transition agroécologique dans le monde. Une première conférence internationale a été organisée en octobre 2021 à Montpellier.

04.03.22

SOCIÉTÉ



© INRAE - Philippe Cicchero, 2021

## RECHERCHES PARTICIPATIVES, PREMIÈRES ÉLUES

Pour sa première édition, le prix de la recherche participative 2021, organisé par INRAE, a été remis au Salon de l'agriculture 2022.

Le projet **CITIQUE**, visant à mieux comprendre l'écologie des tiques et les maladies qu'elles transmettent, dont la maladie de Lyme, remporte le prix de la catégorie Crowdsourcing pour la forte implication des citoyens dans la collecte des tiques.

Le projet « Sélection participative de blé dur biologique » est quant à lui lauréat de la catégorie Participatif, récompensant ainsi la co-production de connaissances entre chercheurs, agriculteurs, fabricants de pâtes et boulangers pour créer et sélectionner des variétés adaptées aux agricultures à faibles intrants ou en AB et qui conviennent à toute la filière, de la semence à l'assiette.

26.02.22

LIVRE BLANC

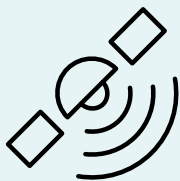
# ACCOMPAGNER LA TRANSITION NUMÉRIQUE DE L'AGRICULTURE

Le numérique, du fait des opportunités qu'il ouvre en termes d'outils technologiques ou d'aides à la décision, est au cœur de l'avenir de l'agriculture, l'alimentation durable et de l'environnement. Ayant trait en particulier à la souveraineté des données et leur utilisation, ces opportunités ne vont pas sans risque. Partenaires de longue date,

auteurs d'un livre blanc sur le numérique, **Inria** et **INRAE** renforcent leur collaboration avec un nouvel accord signé au Salon de l'agriculture pour accompagner l'ensemble des acteurs : agriculteurs, industriels, décideurs publics et État sur le chemin des transitions pour lesquelles le numérique est un formidable accélérateur.

29.10.21

CARBONE



### Une carte satellitaire mondiale pour suivre la séquestration de carbone en forêt

Unique au monde, la plateforme, Biomass Carbon Monitor, ouverte à tous, recense les variations de stockage de carbone de l'atmosphère réalisé par les forêts. Lancé en 2021, cet outil associe l'expertise d'INRAE, du Laboratoire des sciences du climat et de l'environnement (LSCE) et de Kayrros, start-up française, et démontre que les régions de l'hémisphère nord stockent le carbone, tandis que les régions tropicales touchées par la déforestation sont émettrices. De quoi aider les gouvernements à atteindre la neutralité carbone.

Plus d'infos sur : [carbonstocks.kayrros.com](https://carbonstocks.kayrros.com)

10.01.22

START-UP



### Vers un vaccin nasal contre le virus SARS-CoV-2

Efficace contre la transmission du virus de la Covid-19, protéique, sans adjuvant, à logistique simplifiée... un vaccin original, administré par voie nasale, a été mis au point par des scientifiques de l'unité BioMAP (INRAE-Université de Tours). Fondée sur ces travaux, la start-up française LoValTech, labellisée Deeptech par BPI France, développera ce vaccin, avec une licence d'exploitation exclusive. Le démarrage des tests chez l'humain se prépare, en vue d'une autorisation de mise sur le marché fin 2023, début 2024.

29.11.21

PRIX



© INRAE

## LES LAURIERS 2021 D'INRAE

Sept lauriers ont été remis lors d'une cérémonie en présence de la ministre chargée de la Recherche, associant, en vidéo, le ministre de l'Agriculture.

Le jury international a consacré des travaux, dans le domaine de l'épigénétique, à travers le prix Espoir scientifique attribué à **Lucie Marandel** pour l'étude de l'influence de l'alimentation des truites sur leur métabolisme, et le Grand prix, décerné à **Hervé Vaucheret**, insatiable pionnier en épigénétique végétale, qu'il a abordée de manière fortuite à partir de ses travaux sur l'immunité des plantes. Enracinées dans la révolution de l'écologie microbienne des sols, les recherches de **Laurent Philippot** ont été saluées par le prix Défi

scientifique. Des travaux innovants, dont l'impact pour la société, en particulier sur la santé et les politiques publiques, est tangible, ont également été reconnus par les trois lauriers décernés à **l'équipe de recherche sur le bien-être animal**, **l'unité InfoSol au service de la gestion durable des sols**, et l'ingénieure en sécurité alimentaire **Jeanne-Marie Membré**. Ouvrir les sciences et partager les données est un engagement de longue date d'INRAE, comme dans la carrière d'**Esther Dzalé**, récompensée par un laurier d'Appui à la recherche : la mise à disposition par INRAE d'un entrepôt de données scientifiques à l'échelle de l'enseignement supérieur et de la recherche français en est une concrétisation.

21.12.21

INNOVATION



## CHAUD LES MARRONS !

Avec sa jolie couleur acajou et sa haute valeur gustative, la Jeannette, nouvelle variété de châtaigne, va ravir les papilles des amateurs de marrons grillés. Au verger, cette nouvelle variété de châtaigner est plus résistante aux différentes maladies et ravageurs. Des qualités récompensées par le prix Sival d'argent 2022 dans la catégorie Innovation variétale.

01.02.22

EAU

## INRAE au Varenne agricole de l'eau

Face à l'accélération du changement climatique et ses conséquences sur la production agricole, le gouvernement français a lancé en mai 2021 le Varenne agricole de l'eau et de l'adaptation au changement climatique. Réunissant plus de 1400 parties prenantes (représentants agricoles, associations, élus, etc.) en groupe de travail pendant neuf mois, cette concertation à laquelle INRAE a pris une large part, tant par ses travaux que par l'implication de ses chercheurs, a abouti à un engagement de l'État et des filières pour agir sur trois axes :

- se doter d'outils d'anticipation et de protection de l'agriculture face aux aléas climatiques ;
- renforcer la résilience de l'agriculture face au manque d'eau via une approche globale intégrant nouveaux outils et pratiques ;
- partager une vision raisonnée des besoins et de l'accès à l'eau.

14.12.21

EXPERTISE

## POUR UN DROIT À L'ALIMENTATION DURABLE

Quatre chercheuses INRAE ont participé à l'expertise du *think tank* Terra Nova intitulée *Vers une sécurité alimentaire durable : enjeux, initiatives et principes directeurs*. Au centre de cette expertise, l'analyse des dispositifs actuels d'aide alimentaire et plus encore que des pistes pour les améliorer, les auteurs préconisent de mettre en place un droit à l'alimentation durable, et développer, entre autres, une sécurité sociale de l'alimentation.

24.11.21

BIOÉCONOMIE



©Stéphane Compoint, 2021

### L'ACV pour une méthanisation plus efficace

Le développement de la production de gaz renouvelable dans les territoires repose aujourd'hui essentiellement sur le procédé de méthanisation, technologie la plus mature, soulevant cependant des questions sur ses impacts notamment. Pour quantifier les impacts environnementaux de la production de biométhane issu des résidus agricoles, les experts d'INRAE Transfert, ont réalisé une étude ACV - Analyse du Cycle de Vie. Cette étude d'une ampleur inédite compare les impacts d'activités de polyculture ou d'élevage avec méthanisation et sans. Sur la base de 16 indicateurs-clés, elle conclut à des impacts majoritairement bénéfiques ou neutres en cas de méthanisation, avec des résultats contrastés selon les indicateurs, qui permettent de préciser des modes de bonne gestion.

## AGENDA

9 - 20 mai  
COP15 sur la lutte  
contre la désertification  
[Abidjan, Côte d'Ivoire]  
[unccd.int/convention/governance/cop#](https://unccd.int/convention/governance/cop#)

Juin  
Lancement du  
projet French Gut  
[Paris]  
[url.inrae.fr/3wktUWB](https://url.inrae.fr/3wktUWB)

2 - 3 juin  
Vers une agriculture  
sans pesticide  
[Dijon]  
[tpfagri2022.colloque.inrae.fr/](https://tpfagri2022.colloque.inrae.fr/)

13 juin  
One Health -  
Quelle recherche pour  
penser l'élevage de demain ?  
[conférence PFUE]  
[Paris]  
[url.inrae.fr/3L4r7oK](https://url.inrae.fr/3L4r7oK)

Jusqu'au 7 août  
Exposition Banquet  
[Cité des Sciences - Paris]  
[cite-sciences.fr/fr/au-programme/expos-temporaires/banquet/](https://cite-sciences.fr/fr/au-programme/expos-temporaires/banquet/)

## À LIRE

### De l'œnologie à la viticulture

Par Alain Carbonneau,  
Jean-Louis Escudier  
Éditions Quae, 39 €  
(Ebook 26,99 €).

Ce livre donne un aperçu complet sur la viticulture et le vin : des informations générales sur les conditions de culture de la vigne, les composés du vin et sa microbiologie, les techniques œnologiques, le traitement et le conditionnement du vin, la filière de production vinicole en France, la dégustation du vin et son analyse sensorielle, les autres produits de la vigne consommés, un zoom sur des produits d'excellence (champagne, cognac), le vin dans la cuisine, les pays producteurs de vin et la consommation de vin dans le monde et en France, les bienfaits du vin sur la santé. Une mine d'informations pour un public large.



### Les productions fruitières à l'heure du changement climatique

Risques et opportunités en régions tempérées

Par une quarantaine d'auteurs, coordination Jean-Michel Legave.  
Éditions Quae, 36 €  
(Ebook 24,99 €).  
En collaboration avec le GIS fruits, INRAE (metaprogramme CLIMAE), Cep innovation et Novadi.

Les productions fruitières de climats tempérés sont issues de cultures très diversifiées, souvent inféodées à des régions. Quels effets le changement climatique va-t-il induire sur les performances, la diversité et la répartition de ces cultures ? Quels outils et quels leviers pour l'adaptation des cultures fruitières au changement climatique ? Comment concilier adaptation climatique et compétitivité économique ? Pour répondre à ces questions, cet ouvrage présente un vaste panorama de

connaissances, allant des évolutions et des prédictions climatiques aux processus écophysiologiques et agronomiques déterminant la production des plantes fruitières. Analyse des impacts potentiels, ou déjà avérés, leviers susceptibles de mener aux adaptations projetées sont explorés à la lumière des adaptations déjà mises en place en climats chauds. Cet ouvrage rassemble des acquis scientifiques, des données, des outils et des perspectives. Il s'adresse aux professionnels, chercheurs, enseignants et étudiants.

### La revue *Sesame* N° 11 – mai 2022

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

- Microbiote et éthique.
- Le droit à l'épreuve des nouveaux préjudices environnementaux.
- Circuits courts et très longues distances.
- La nature est morte, vive le vivant ?

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

### *Roots of tomorrow*, le nouveau jeu vidéo pour découvrir l'agroécologie !

Un jeu produit par la société Gamabilis avec les acteurs du monde agricole et les régions. À retrouver sur la plateforme STEAM.

*Roots of Tomorrow* est un jeu de gestion et de stratégie qui invite le joueur à transformer sa ferme en intégrant les pratiques agroécologiques.

La partie se déroule sur une période de 10 ans. Le joueur établit sa propre stratégie pour faire fonctionner au mieux son exploitation en remplissant de façon équilibrée les trois critères de performances :

- l'exploitation est-elle viable économiquement ?
- quel est l'impact sur l'environnement de son exploitation ?
- quelle est l'utilité sociale de l'exploitation et notamment quelle population peut être nourrie ?





## Zéro pesticide

Un nouveau paradigme de recherche pour une agriculture durable

Coordination éditoriale : Florence Jacquet, Marie-Hélène Jeuffroy, Julia Jouan, Édith Le Cadre, Thibaut Malausa, Xavier Reboud, Christian Huyghe. Éditions Quae, 39 € (Ebook gratuit)

L'usage des pesticides chimiques est une préoccupation sociétale majeure en raison de leurs impacts négatifs sur l'environnement et la santé. Le Programme prioritaire de recherche (PPR) « Cultiver et protéger autrement », lancé en 2019 et piloté par INRAE, vise à structurer la recherche en vue d'une protection des cultures sans pesticides. L'objectif de l'ouvrage est d'expliquer les bases de cette stratégie et les principes d'actions. En se fixant un cap zéro pesticide, la recherche tente de dépasser les verrous actuels et de produire des innovations de rupture dans les champs biotechniques

et socio-économiques. Un ouvrage à destination des acteurs de la recherche, de l'enseignement, du secteur agricole, mais aussi de l'innovation, du développement et du conseil. Covid-19 ? Cette crise révèle la difficulté des décideurs à appréhender des problèmes complexes : pour les auteurs, le réflexe qui consiste à créer de nouvelles organisations en réponse à l'incertitude a fait la preuve de son inefficacité. Selon eux, les dirigeants devraient, face aux défis de la crise sanitaire en cours, adopter une démarche scientifique plutôt que d'attendre de la science une vérité absolue.

## SOCIÉTÉ

### L'eau une ressource vitale

Page dédiée en ligne : [url.inrae.fr/2PczXJH](http://url.inrae.fr/2PczXJH)

#### Podcast

**La boucle est bouclée**  
L'eau, de votre douche à la nature  
[inrae.fr/podcasts-inrae](http://inrae.fr/podcasts-inrae)

## DÉCRYPTAGE

### Microbiote, un monde de microorganismes

Page dédiée en ligne : [inrae.fr/alimentation-sante-globale/microbiote\\_intestinal](http://inrae.fr/alimentation-sante-globale/microbiote_intestinal)

13 webinaires pour tout savoir sur le microbiote  
[url.inrae.fr/3pZrxVf](http://url.inrae.fr/3pZrxVf)

Film ARTE - Le fabuleux pouvoir du ventre  
En VOD, 2,99 €. [boutique.arte.tv](http://boutique.arte.tv)

## FUTURS

### Quelles gestions des forêts pour demain ?

MOOC « Comprendre la gestion forestière », prochaine session mai-juillet 2022  
[inrae.fr/actualites/1er-mooc-gestion-forestiere](http://inrae.fr/actualites/1er-mooc-gestion-forestiere)

Forêts et risques climatiques, explications en vidéo avec le RMT Aforce  
[youtu.be/N8i-CEy1rcc](http://youtu.be/N8i-CEy1rcc)

Innover en forêt avec le projet de territoire « Des Hommes et des Arbres » : [www.deshommesetdesarbres.org](http://www.deshommesetdesarbres.org)

Dossier « incendies de Forêts » : [inrae.fr/actualites/incendies-foret](http://inrae.fr/actualites/incendies-foret)

## LE DICTON DE SAISON

# Des fleurs que mars verra, peu de fruits on mangera

Que signifie ce dicton printanier ? Est-il exact au plan biologique ? À quelles variétés se réfère-t-il ? Le décryptage d'Iñaki Garcia de Cortazar Aauri<sup>1</sup>, ingénieur de recherche et directeur de l'unité AgroClim.

« Derrière ce dicton, je vois tout de suite l'appréhension du risque de gel : une végétation qui démarre trop tôt, alors que le printemps n'est pas encore installé – même si on est ravis de voir apparaître des fleurs –, est synonyme de danger pour la fructification à venir. C'est le cas pour la plupart des fruitiers : pruniers, abricotiers, pêcheurs... » Autant le froid est salubre en hiver pour le cycle des plantes, autant il devient menaçant, voire fatal, lorsqu'il se manifeste à nouveau, de manière tardive, alors que la végétation est entrée dans une nouvelle phase, celle du réveil et des bourgeonnements. Des fleurs détruites par le gel ne produiront pas de fruits... Pour les agriculteurs et les chercheurs qui travaillent sur la sélection des espèces, « l'équilibre est sensible, car à vouloir des variétés qui produisent tôt dans la saison, pour obtenir une récolte précoce et par conséquent les meilleurs prix de vente sur le marché, on augmente aussi le risque de perte à cause du gel ». Typiquement, les sélectionneurs travaillent sur des variétés de cerisiers qui échappent au gel tout en produisant rapidement. Un véritable casse-tête, avec une météorologie de plus en plus surprenante d'une année sur l'autre, et des températures qui peuvent brouiller les pistes. N'a-t-on pas relevé des températures autour de 20 °C fin décembre 2021 dans

**PHÉNOLOGIE**  
étude des cycles saisonniers du vivant en fonction du climat.

**DÉBOURREMENT**  
processus d'éclosion des feuilles des cepes de vigne à la sortie de l'hiver dès l'apparition des bourgeons

1. Ses travaux portent sur l'évaluation des impacts du changement climatique sur le fonctionnement et la viabilité des agroécosystèmes. Il coordonne le Réseau national d'observatoires de la phénologie ([tempo.pheno.fr](http://tempo.pheno.fr)) depuis 2017. [agroclim.inrae.fr](http://agroclim.inrae.fr)

le Sud-Ouest ? La phénologie est un précieux indicateur biologique du changement climatique. L'équipe d'AgroClim scrute l'actualité, à l'affût de chaque épisode climatique inhabituel.

## Changement climatique et cycle des saisons

Et notre époque est de plus en plus riche d'exemples de perturbations, avec à la fois des événements extrêmes – ainsi le coup de gel en avril 2021 qui a détruit une grande partie des récoltes des abricotiers dans le sud de la France – et une avancée des dates des différentes phases du cycle végétal. « La vigne est un bon exemple : en 2021, dans le Bordelais et le Val de Loire notamment, le débourrement a démarré plus tôt que d'habitude suite à une météo très clémente et plusieurs petites feuilles étaient déjà apparues en avril lorsque le gel a fait des dégâts. Plus globalement, on observe depuis les années 1970 une avancée des dates de vendanges, de 3 à 4 semaines en moyenne, selon les vignobles. » Pour protéger les vignes du gel et retarder la date de débourrement, il existe des techniques, comme décaler la taille d'hiver, juste avant que la vigne ne débouresse (entre mi-mars et mi-avril selon les régions), « mais cela implique de trouver la main d'œuvre disponible à cette époque, même si cela peut s'avérer plus efficace et non générateur de surcoûts comme le positionnement de bougies ou de ventilateurs dans les vignes pendant plusieurs nuits en cas de gel tardif ».

Si certains dictons ont vieilli, celui-ci garde tout son sens aujourd'hui, entre l'avancée des saisons qui poussent à l'éveil de la végétation, et des aléas climatiques qui la bousculent par ailleurs. De quoi alimenter les travaux des chercheurs, mais aussi celui des assureurs, auxquels les agriculteurs vont davantage devoir faire appel à l'avenir. ●





**Il n'y a pas d'agriculture sans eau. Comment préserver au mieux l'harmonie de ce couple millénaire assombrie par le changement climatique, avec une agriculture plus demandeuse et une eau moins accessible? Systèmes agroalimentaires plus durables, partage de l'eau dans les territoires et politiques publiques d'accompagnement sont les pistes étudiées pour une meilleure gestion quantitative de l'eau.**

