

T D C

TEXTES ET DOCUMENTS POUR LA CLASSE

Programme
SVT
Classes de 2^{de}
et 1^{re}

AGROSYSTEMES

LA NATURE À NOTRE SERVICE ?

1124 | REVUE BIMESTRIELLE | 1^{er} NOVEMBRE 2019 | www.reseau-canope.fr/revue-tdc

9,90 euros



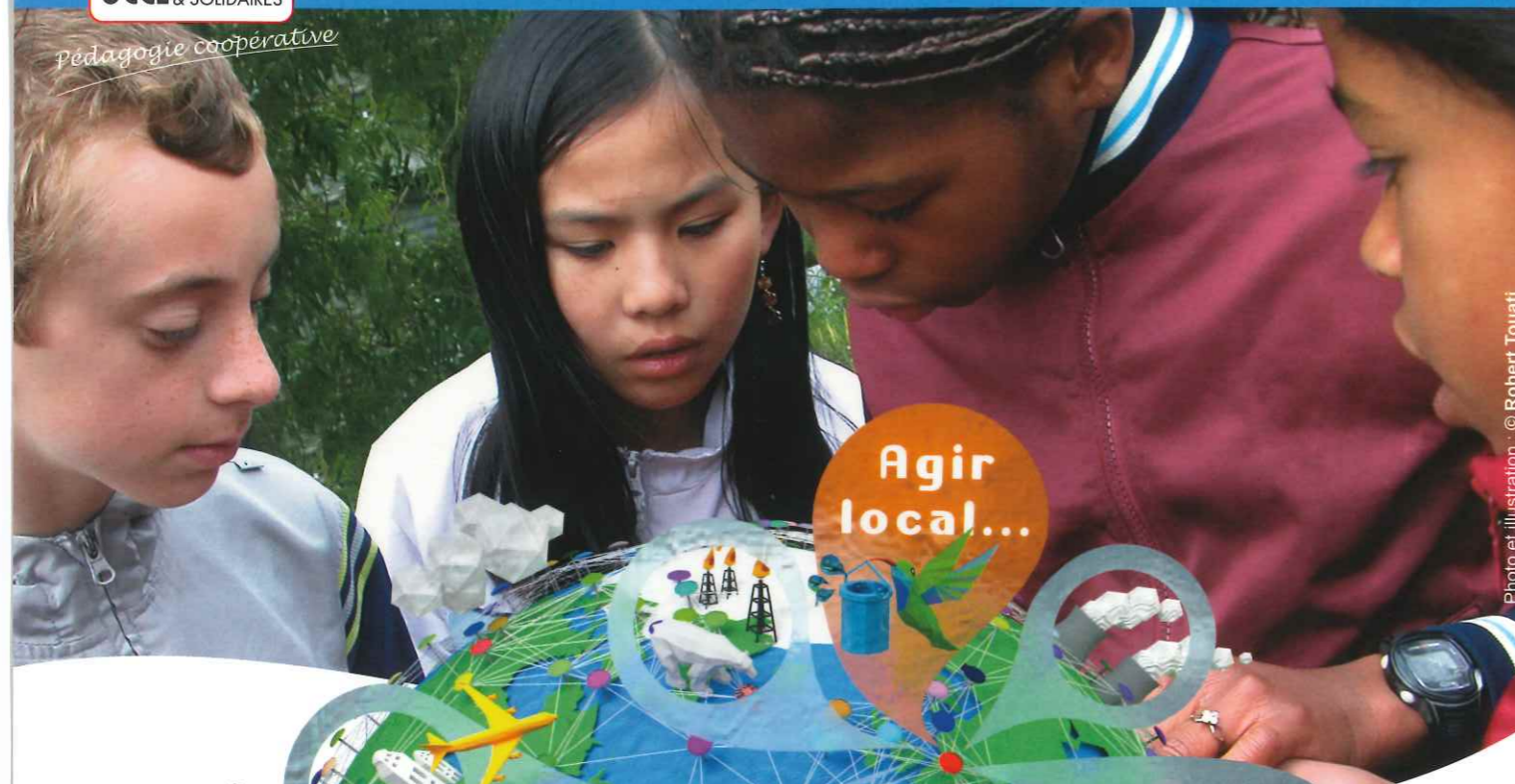
W0017371

CANOPÉ
ÉDITIONS

ex: 12/20



pedagogie cooperative



Agir local...

Photo et illustration : © Robert Touati

éco'coop
l'Agenda 21
des coopératives OCCE

Pour inscrire votre classe à
l'action éco'coop une seule adresse :
www.occe.coop rubrique *nos actions*

www.occe.coop
Office Central de la Coopération à l'École

ex: 12120

T D C S O M M A I R E

AGROSYSTEMES. LA NATURE À NOTRE SERVICE ? | 1124 | 1^{er} NOVEMBRE 2019

4 L'ESSENTIEL 6 L'ENTRETIEN AVEC GILLES BOEUF
RESTAURER LE VIVANT
Par Delphine Cuny, Sophie Delhaume

DOSSIERS SCIENCES

- 14 DYNAMIQUE DES SYSTÈMES VIVANTS | Denis Couvet
18 LES CYCLES DE VIE D'UN ÉCOSYSTÈME | Cécile Bessou, Alexis Thoumzeau, Tiphaine Chevallier
22 LE RÔLE DES SOLS DANS LES CYCLES BIOGÉOCHIMIQUES | Pierre-Yves Bernard
26 LES SOLS, DES MILIEUX FRAGILES À PROTÉGER | Julien Demenois, Vincent Freycon
30 COMMUNICATION ET RÉSEAUX SOCIAUX CHEZ LES PLANTES | Francis Martin
34 LE PHYTOBIOME ET L'AGRICULTURE DE DEMAIN | Philippe Roumagnac, Hervé Sanguin
38 ÉCOSYSTÈMES ET AGROSYSTEMES | Éric Malézieux, Bruno Rapidel
42 LES SERVICES ÉCOSYSTÉMIQUES POUR ÉVALUER NOTRE IMPACT | Alexandra Langlais
46 CULTIVER LA DIFFÉRENCE | Cyrille Violle
50 PORTFOLIO : VIVRE AVEC LE VIVANT

À LA CROISÉE DES SAVOIRS

HISTOIRE-GÉOGRAPHIE

56 SUCRE ET POLITIQUE, DE LA CANNE À LA BETTERAVE | Marcel Dorigny

LETTRES

- 60 HENRY DAVID THOREAU ET LE « NATURE WRITING » | François Specq
64 DÉFENSE ET ILLUSTRATION DE L'ENVIRONNEMENT | Pierre Schoentjens

ARTS

68 POUR UN ART DE LA PRÉSENCE | Marianne Lanavère

71 RESSOURCES 74 ABONNEMENT

Focus pédagogiques à retrouver sur : www.reseau-canope.fr/notice/tdc-n-1124-1er-novembre-2019.html

LE COÛT DE MON LOOK
Fabienne Cazassus (niveau collège)

AGROSYSTEMES ET ÉCOSYSTEMES AU LYCÉE
Guillaume Blandre (niveau lycée)



Les nouveaux programmes de SVT du lycée consacrent une large part aux « enjeux contemporains de la planète » : environnement, développement durable, gestion des ressources et des risques, etc. Des sujets ô combien d'actualité, sur lesquels la recherche est particulièrement active.

Les travaux des scientifiques synthétisés dans les rapports du GIEC donnent par exemple des éléments sur l'état du climat et sur son évolution prévisible. En parallèle, la communauté scientifique produit régulièrement des états des lieux concernant la biodiversité. Ainsi le rapport d'évaluation mondiale sur la biodiversité et les services écosystémiques de mai 2019, produit par l'IPBES (Plateforme intergouvernementale sur la biodiversité et les services écosystémiques), établit l'état actuel de la biodiversité et des projections pour les années à venir selon plusieurs scénarios prenant en compte la démographie, le climat, les pratiques... Ses conclusions sont alarmantes.

Manger, s'habiller, se chauffer, se soigner, construire sont autant de nécessités qui reposent sur les services rendus à l'humanité par les écosystèmes : nous dépendons de leur bon fonctionnement. En les transformant pour produire, nous créons des agrosystèmes qui, quoique simplifiés, se comportent comme les écosystèmes « naturels ». Ainsi, lorsque l'actualité scientifique et sociétale nous alerte sur la dégradation des écosystèmes et de la biodiversité, il faut entendre que c'est un enjeu majeur y compris pour l'espèce humaine. Il est donc urgent de former des citoyens éclairés et susceptibles d'agir.

C'est ce que proposent les nouveaux programmes de SVT du lycée. Il s'agit aujourd'hui de faire comprendre aux jeunes les enjeux des débats autour de la biodiversité : elle constitue d'une part notre environnement, mais aussi le support de notre production agricole. Et cela ne peut être déconnecté des questions climatiques, de la disponibilité des ressources (énergie, eau, espace cultivable...), et des problématiques des intrants, pesticides et engrais. Ce numéro de TDC fait état des recherches actuelles autour de ces notions clés afin de donner aux enseignants des pistes concrètes pour les enseigner.

- Le fonctionnement des écosystèmes repose sur les interrelations entre leurs composants. Elles gouvernent la stabilité de ces systèmes, en particulier celles impliquant les micro-organismes qui vivent en étroite association avec les végétaux.
- Le sol joue un rôle crucial dans les cycles de la matière. Nos pratiques agricoles le modifient profondément, son seuil de résilience risque d'être atteint.
- Notre rapport à la nature évolue : nous devons réaliser une transition agroécologique afin de mieux produire sans compromettre la capacité des agrosystèmes à nourrir demain une humanité de plus en plus nombreuse.

TDC ÉVOLUE !

Vous tenez entre vos mains le premier numéro de la nouvelle formule éditoriale de *Textes et documents pour la classe*. Sa vocation a toujours été de coller au plus près des besoins des enseignants, de leur fournir des outils directement exploitables dans la préparation de leurs cours. Pour continuer dans cette direction, il nous semblait nécessaire de faire évoluer le contenu de la revue, afin de nous inscrire notamment dans les nouveaux programmes du lycée. Vous retrouverez désormais dans chaque numéro un point précis de programme, traité principalement sous l'angle de la discipline concernée (le « Dossier »). En complément, quelques articles viendront éclairer l'enseignant désireux d'augmenter ses connaissances générales sur la problématique, afin d'avoir une vision plus large, empruntant le prisme d'autres disciplines (« À la croisée des savoirs »). N'hésitez pas à nous faire savoir ce que vous pensez de cette nouvelle formule sur tdc@reseau-canope.fr.

Bonne lecture !



Le site qui parle d'environnement et de développement durable aux collégiens, lycéens et étudiants

mtaterre.fr a été créé il y a plus de dix ans par l'Ademe (Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie) pour les jeunes. Développement durable, changement climatique, mode éthique, énergies renouvelables, pollutions, alimentation durable, déchets... ce site réunit tous les contenus utiles pour comprendre les enjeux environnementaux et protéger la planète au quotidien.

DES CONTENUS RICHES ET DIVERSIFIÉS

► **Des informations, des conseils, des actualités** sont régulièrement publiés sur des thèmes variés : l'impact de la mode, des smartphones, comment organiser des vacances écoresponsables, l'essor de l'économie sociale et solidaire...

► **Du contenu multimédia**, ludique et attractif, est également proposé : vidéos humoristiques, infographies, « ThingLinks », jeux, bandes dessinées...

► **Le menu Bons gestes** offre également aux jeunes d'agir à leur échelle en leur proposant des gestes écologiques et des bons réflexes pour protéger l'environnement : « Je réfléchis avant d'ouvrir le frigo et je ne laisse pas sa porte ouverte », « À la pause, je ne grignote pas de portions individuelles », « Je pense à aérer la salle de classe sans trop la refroidir », « Je partage plutôt que d'acheter du neuf »... Chaque bon geste est accompagné d'explications et de solutions pour y arriver facilement !

► **Des espaces d'expression** permettent enfin aux internautes de partager leurs idées et de poser des questions.

S'APPROPRIER LES THÉMATIQUES DE L'ENVIRONNEMENT

M ta Terre offre un accompagnement aux élèves avec une section Préparer des exposés pour leurs travaux à rendre, un TPE, un devoir à la maison... Ces aides peuvent être complétées par des dossiers qui proposent une vulgarisation approfondie des sujets environnementaux : fonctionnement de la méthanisation, enjeu de la prévention des déchets, protection des ressources... Les contenus sont travaillés afin d'être accessibles dès le collège et sont adaptés aux différents programmes scolaires.

DE NOMBREUX OUTILS PÉDAGOGIQUES À DISPOSITION

Expositions, affiches, guides pratiques, livrets d'information, jeux de cartes... Tous les outils pédagogiques pour parler des thématiques liées à l'environnement sont dans la rubrique Multimédia. Une partie de ces outils est proposée à la commande, gratuitement.

Plus d'informations sur www.mtaterre.fr/multimedia

Entretien avec Gilles Boeuf, professeur à la Sorbonne Université, président du conseil scientifique de l'Agence française pour la biodiversité.

Par Delphine Cuny et Sophie Delhaume

RESTAURER LE VIVANT

Changer notre rapport à la nature pour la sécurité alimentaire mondiale est l'urgence à laquelle la transversalité des savoirs, l'agroécologie et l'éducation se doivent de répondre.

Nous commençons à prendre globalement conscience de l'impact de l'être humain sur son environnement, notamment par le changement climatique. Quelles autres conséquences découlent de l'activité humaine et de notre rapport à la nature ?

On assiste aujourd'hui à un effondrement du nombre des individus dans les populations des espèces sauvages. Aussi emblématiques soient-elles, elles s'effondrent. On a tué par exemple 50 % des éléphants en 40 ans, 50 % des girafes en 50 ans. Cela se passe en très, très peu de temps. En France, en 15 ans, on a perdu 30 % des oiseaux communs dans les territoires agricoles : le rouge-gorge, le chardonneret, l'alouette des champs... qui n'étaient pas des oiseaux rares ! En 27 ans, les Allemands ont perdu, eux, 75 % de la totalité des insectes qui volaient dans une région pourtant mise en réserve. Un papier, publié début 2019 par des collègues australiens (Sánchez-Bayo et

Wyckhuys, voir Savoir +), montre qu'il y a un effondrement du nombre d'individus des populations d'insectes à l'échelle de la planète entière, avec un danger de disparition à plus long terme. Enfin l'indice Planète vivante du WWF, qui catalogue les espèces menacées chaque année en octobre évoque, pour l'année 2018, 60 % de baisse d'effectifs chez les populations de vertébrés, dans différents écosystèmes : terrestre, marin, d'eau douce... ce dernier milieu étant le plus touché du fait de sa raréfaction induite par les grandes plaines de monoculture intensive.

L'effondrement du vivant touche aussi les milieux, les organismes et les plantes qu'ils abritent. On parle beaucoup du climat qui change, c'est une réalité, mais il ne faudrait pas que cette donnée cache le reste. Le vivant ne s'en va pas seulement à cause du changement climatique, loin de là, c'est un tout qui contribue à sa destruction systématique.



PROFIL | GILLES BOEUF

Gilles Boeuf est professeur à la Sorbonne Université et développe sa recherche au sein de l'unité Biologie intégrative des organismes marins de l'observatoire océanologique de Banyuls. Président du Muséum national d'histoire naturelle entre 2009 et 2015, il a également été professeur invité au Collège de France sur la chaire Développement durable, énergies, environnement et sociétés. Conseiller scientifique au cabinet de Ségolène Royal, alors ministre de l'Environnement, de l'Énergie et de la Mer, il est aujourd'hui président du conseil scientifique de l'Agence française pour la biodiversité.

Que recouvre cet effondrement de la biodiversité et qu'a-t-il à voir avec nos systèmes d'exploitation ?

Concernant le sol, nous avons perdu 75 % de ce qui le constitue dans certains endroits. Prenez une poignée de terre d'un sol agricole de la Beauce ou d'ailleurs, triturez-la, sentez-la, regardez sa couleur : vous ne verrez ni ne sentirez rien, car il n'y a plus rien dedans. Il y a l'arrachage des haies pour le remembrement des parcelles, les labours dans le sens de la pente, les adjonctions des produits chimiques toxiques : fertilisants, pesticides et insecticides qui tuent la faune du sol et l'appauvrissent. Puisqu'il est de plus en plus pauvre, on augmente la fréquence des « apports », leur dosage, si bien qu'il n'a plus rien de naturel. En aucun cas ces sols ne pourront nous permettre d'alimenter 8 milliards d'humains demain.

C'est un véritable saccage : la forêt tropicale, les araucarias de Patagonie, et plus près de nous, le littoral de la Côte d'Azur. Et tout cela s'est passé en moins de 100 ans ! Quant à la pollution, elle ne connaît pas de frontières et se dissémine partout, jusqu'aux zones inhabitées par l'homme. En Arctique, il y a deux ans, alors que nous observions des oies bernaches qui n'avaient jamais vu d'humains, nous nous sommes aperçus que leurs tissus – que nous avons analysés – étaient gorgés de substances nocives, et notamment



d'insecticides qui étaient commercialisés dans les années 1950 ! Le réchauffement global a permis à ces produits de s'échapper des sols en remontant, puis, avec la vitesse de rotation de la Terre, d'arriver jusqu'en Antarctique et en Arctique où ils se sont déposés dans la toundra pour contaminer ensuite toute la chaîne alimentaire. Nous pourrions aussi évoquer l'exemple du gaz carbonique responsable de l'acidification de l'océan... En bref, c'est à une destruction massive que nous assistons, c'est pourquoi nous devons réviser notre rapport à l'exploitation.

D'après la FAO – la Food and Agriculture Organization (Organisation des Nations unies pour l'alimentation et l'agriculture) –, nous avons dépassé des seuils que nous n'aurions jamais dû atteindre. Aujourd'hui, on estime qu'environ un tiers des stocks mondiaux de poissons sont surexploités. Pratiquement rien n'est sous-exploité avec la mondialisation. C'est elle aussi qui accélère le phénomène de dissémination des espèces non autochtones que nous connaissons et qui fragilisent les écosystèmes : le frelon asiatique,

la pyrale du buis, le charançon des palmiers dans le Sud de la France, le varroa, cet acarien d'Asie du Sud-Est auquel l'abeille asiatique résiste mais pas notre abeille domestique.

Peut-on cesser de penser « exploitation » et surexploitation, artificialisation, privatisation et brevets sur le vivant et s'acheminer vers une interaction vertueuse avec la nature ?

Oui, et c'est maintenant le seul véritable enjeu de notre civilisation. Nomade, l'humain s'est arrêté de bouger il y a 12 000 ans. Auparavant, il prélevait dans la nature ce qui garantissait sa subsistance et se déplaçait ensuite vers d'autres ressources, permettant ainsi à la nature de se régénérer. Puis nous avons inventé l'agriculture et l'élevage, dès le moment où nous avons été contraints de vivre pendant un long moment de l'année sur une zone restreinte et de produire nos ressources. Sans agriculture il n'y a pas d'humanité. C'est elle qui a permis l'explosion de la démographie, et nous allons bientôt être 8 milliards sur la planète. Alors comment faire pour alimenter une si

Philippe Echaroux, « Luna », projet Amazonia, 2016. Au Brésil, la forêt primaire amazonienne a offert un support de projection aux portraits de la tribu autochtone surui qui protège et replante les arbres contre la déforestation massive et le pillage des orpailleurs. Malgré le combat des Indiens indigènes, c'est plus de 300 camions par jour qui quittent les lieux chargés d'arbres saccagés. En danger, le peuple surui en appelle à l'aide internationale.

grande population ? Quelques peuples pratiquent encore la cueillette, mais ils sont très peu nombreux. De rares populations vivent aujourd'hui en communion avec le vivant en Sibérie ou dans la forêt tropicale et se nourrissent de leur chasse, mais ce sont des minorités. En transposant nos pratiques actuelles, on ne peut comprendre comment les plus « anciens Français », les Homo erectus, arrivés il y a 700 000 ans à Tautavel, ont fait pour vivre dans une vallée resserrée pendant 600 000 ans sans totalement détruire l'écosystème. Cette relation entre la démographie et une forme d'« exploitation » des ressources est importante à saisir. Aujourd'hui, il ne s'agit plus de prélèvement mais de production.

Doit-on continuer à exploiter la nature comme nous le faisons ? En sachant qu'il n'y a pas de stock prévu par « les dieux » pour l'humanité. Tire-t-on parti de connaissances que l'humain a pu acquérir au cours des temps sur des écosystèmes particuliers ? Nous savons effectuer des repeuplements : de dorades en mer Intérieure du Japon après 1945, après que tout a été détruit par la guerre, puis récemment de coquilles Saint-Jacques, de palourdes, de crevettes, de thons après le désastre de Fukushima – mais, dans ce cas, on utilise le milieu naturel comme support, nous n'agissons pas dans le respect du vivant et de sa temporalité. Nous atteignons chaque année plus tôt que la précédente le seuil de ce que la planète peut nous offrir : il y a 7 ou 8 ans nous le franchissions au mois de septembre, puis au début du mois d'août et aujourd'hui en juillet. Comment ferons-nous pour récupérer le système quand nous aurons un an d'avance ?

Quels problèmes l'uniformisation des semences pose-t-elle ? Et quel rôle peuvent jouer des réservoirs de semences comme celui de Svalbard en Norvège ?

La réponse est politique : il faut autoriser les gens qui produisent des semences à les utiliser, et à les vendre (car c'est là où le bât blesse) pour augmenter la diversité génétique. Ne jamais uniformiser les semences est une règle de base, sinon, nous nous retrouverons de plus en plus fréquemment face à des crises telles que celle qui a frappé les rizières indiennes en 2007. Pour répondre à cette hécatombe, le Cirad [Centre de coopération internationale en recherche agronomique pour le développement] a alors testé 6 300 variétés de riz pour trouver celle qui résisterait au virus. Plus la variabilité génétique au sein des espèces d'un terrain écologique donné sera préservée, et mieux on s'en sortira dans l'avenir. En démocratie, il faut libéraliser les semences, ne pas les mettre entre les mains de quelques grands groupes géopolitiques !



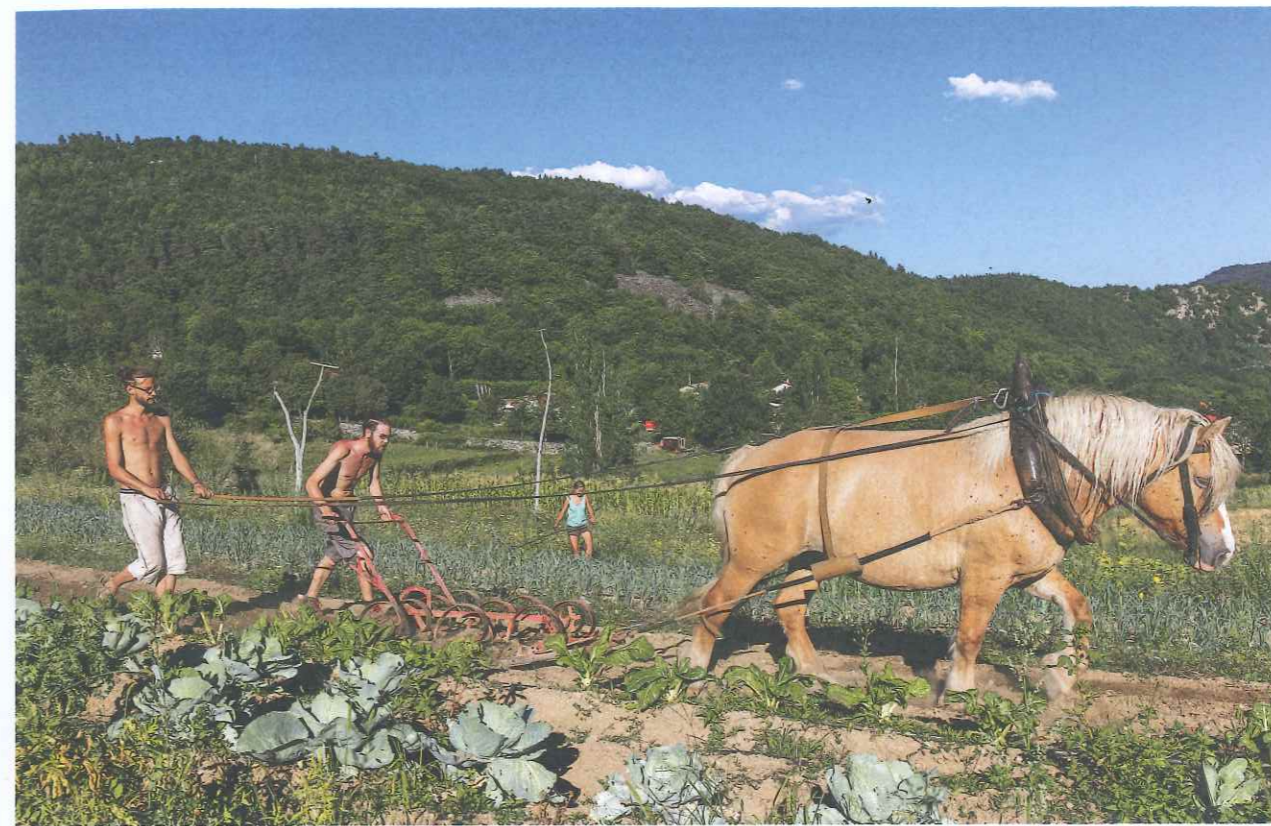
Différentes variétés de maïs, marché central de Cusco, Pérou. Partout dans le monde, des chercheurs agronomes et des paysans œuvrent à la préservation des variétés anciennes pour assurer la diversité génétique végétale dont l'humanité aura besoin demain. Une seule graine qui germe peut en donner cent autres, rendant le vivant exponentiel et remettant en question le système des brevets sur le vivant et la création de graines non reproductibles manipulées pour être en synergie avec les pesticides dont elles dépendent.

Ce réservoir de semences à Svalbard est un non-sens, car il s'agit en réalité d'un conservatoire de graines mortes. Les graines résistent plus ou moins longtemps à la congélation avant de mourir, il y a de l'ADN dedans, mais on ne peut relancer des variétés avec ça que sous certaines conditions. Qui plus est, certaines fondations finançant ce projet sont liées à un ancien semencier

dont les pratiques commencent à être bien connues du public.

Une initiative plus fructueuse est en place aujourd'hui au Mexique sur le maïs. Ils ont créé un jardin botanique dans l'État du Yucatán, à Mérida, où ils repiquent régulièrement les graines que les paysans leur apportent. Les congeler, les repiquer puis recongeler un lot, peut fournir une alternative

La réserve à semences du Svalbard en Norvège (banque de graines du Global Seed Vault), présentée comme le grenier de la biodiversité mondiale, s'avère inadaptée à l'objectif affiché de conservation pour le bien public. Son fonctionnement est remis en cause par les scientifiques et spécialistes du monde entier, ainsi que son financement privé, notamment en raison des liens que la fondation de Bill Gates entretient avec le géant semencier Monsanto, champion des organismes génétiquement modifiés.



seulement si un jardin est associé à l'endroit où l'on congèle des graines et que des agronomes et généticiens de métier travaillent pour qu'on puisse réagir face à une agression qui n'a pas été prévue, un virus, une condition environnementale particulière ou une plaie agricole. Les jardins de particuliers, ils ont une importance fondamentale dans la conservation de la diversité tant animale que végétale. L'échange de graines s'assimile à de la désobéissance passive, puisque l'amendement pour autoriser la vente a été retoqué par le Conseil constitutionnel, mais aussi et surtout à un acte citoyen.

Comment concilier notre besoin de nourrir une humanité en forte croissance démographique avec celui de protéger la fertilité des sols et la qualité de l'eau ?

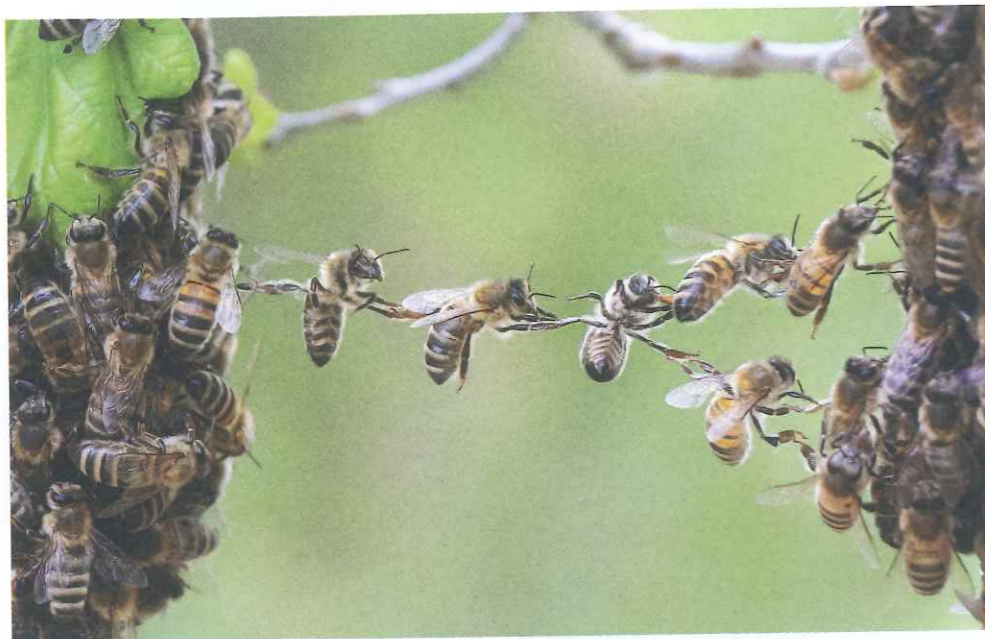
Nous devons produire plus, c'est évident, car nous sommes plus nombreux. Cependant, il faut pouvoir le faire sans augmenter indéfiniment

les surfaces agricoles, parce qu'il faut garder les zones humides et les forêts tropicales pour la biodiversité. Il n'y a que le vivant qui peut résoudre cette problématique par ce que l'on appelle l'agroécologie intensive. Cela passera forcément par de la polyculture. J'ai un ami qui a 140 hectares dans la Vienne et qui fait ses petits pois sous son blé. Pour les moissons, il adapte sa hauteur de fauche en la réglant un peu plus haute que les autres, donc il produit un peu moins que celui qui fait son blé dans la Beauce. Mais quand il a récolté son blé, il fait ses petits pois, bien protégés en dessous, c'est un usage deux en un en quelque sorte. Il utilise 100 fois moins d'insecticides et de pesticides, et devinez quoi ? Ça marche ! Tout va passer par cette approche ancestrale de la polyculture. Il y a des milliers d'agricultures différentes sur la Terre qui se font dans le respect de la biodiversité. Elles sont nos « apporteuses » de solutions.

Alors comment produire plus sans augmenter les surfaces et sans chimie ? Ce sont les agronomes qui travaillent

Ferme de Flaceleyre en Haute-Loire. En agriculture, la polyculture est le fait de cultiver plusieurs espèces végétales au sein d'une même ferme. Son association à l'élevage est la norme dans de nombreuses régions du monde. Les déjections du bétail permettent de fertiliser les sols et de les maintenir productifs.

sur ce qu'on appelle la bio-inspiration qui vont faire l'avenir des terrains agricoles. Car si on veut produire de nouveau dans la Beauce, il va falloir ramener du vivant dans les sols. Cela passe par l'éducation. Il y a quelques années, les cerises subissaient un traitement par an. Aujourd'hui, les producteurs en font six. Dans le monde agricole actuel, les paysans sont les otages d'un système. Tout est venu d'une hérésie de pensée apparue il y a dix ans : le low-cost en matière d'alimentation. Nous devons accepter de payer notre nourriture à un prix décent pour le producteur. Pour remettre les choses à leur place, les subventions européennes à la France dans le cadre de la PAC pour le productivisme représente 8 milliards d'euros, quand 145 millions



La situation critique des populations d'abeilles en France et à l'étranger est due au varroa, parasite arrivé d'Asie, mais aussi à l'utilisation agricole d'insecticides de la famille des néonicotinoïdes. Toujours autorisées en France, ces substances agissent sur le système nerveux central des animaux. Et, bien souvent, elles meurent de faim, il n'y a plus assez de fleurs.

d'euros sont alloués à l'agriculture biologique, soit 40 fois moins ! Il faut qu'on réfléchisse à remettre ce bon sens en place avec le monde paysan, mais, pour cela, il faut d'abord qu'on paye décemment les prix des produits agricoles. Si demain l'on paye le travail des paysans, je suis convaincu qu'après-demain ils baisseront très fort les pesticides.

Il y a 50 ans, dans les paniers, quand vous alliez faire vos courses, la moitié du coût, c'était de la nourriture ; cela représente 15 % aujourd'hui. Continuer à ne pas respecter le travail des agriculteurs n'est pas durable, utiliser toute cette chimie qui coûte très cher et empoisonne les écosystèmes n'est pas durable ; cette agriculture coûteuse en énergie fossile n'est pas durable. Alors réarmons la PAC pour faire quelque chose de beaucoup plus équilibré et harmonieux !

L'espoir vient aujourd'hui du fait que 31 fermes par mois basculent en France du productivisme au bio. Il faut aider ceux dont les terrains ont été très fortement perturbés, les inciter à garder les zones humides dans leur parcelle, à replanter des haies, à se servir de tracteurs plus petits, car la famille sera beaucoup plus à même de gérer le domaine et diverses espèces seront produites avec un plus fort rendement

sans adjonction chimique. Cela n'est pas un beau rêve, cela a fait ses preuves, mais demande de repenser son agriculture. Les collègues du CNRS, de l'équipe de Vincent Bretagnolle, à Chizé [Deux-Sèvres] ont fait un énorme travail : des paysans ont produit avec le niveau de pesticides qu'ils utilisent habituellement, tandis que d'autres ont divisé par deux leur emploi. Le résultat est sans appel : ces derniers ont produit un petit peu moins mais ont gagné 260 € à l'hectare parce qu'ils n'achetaient pas ces produits ! En prime, ils n'empoisonnaient pas les gens. Car il y a en France plusieurs milliers de pesticides autorisés. Qui connaît les effets de ces molécules ? 45 pour le seul maïs ! Il faut changer de paradigme, et le faire avec l'adhésion du monde paysan.

Que dire de la notion de service écosystémique qui apparaît dans les programmes de SVT de 2^{de} et 1^{re} ? En quoi l'avancée de la connaissance scientifique sur le vivant peut-elle nous aider à cheminer vers une agriculture durable ?

Les écosystèmes sont-ils là pour nous rendre des services ? Il faut dire simplement aux enfants, sans contourner voire détourner la question, que ces écosystèmes naturels, sans dire

qu'ils nous rendent des services, sont indispensables pour la purification de l'eau, la pollinisation et que nous ne saurons pas comment les remplacer si nous causons leur perte. Créer des drones pour faire le travail des abeilles que l'on a tuées, est-ce véritablement la réponse ? Non, les drones ne savent pas faire de miel et n'ont pas les aptitudes merveilleuses de l'abeille. Le coût de remplacement du « service » rendu par les pollinisateurs a été calculé par les économistes, et cela est de l'ordre de 200 milliards d'euros par an !

Quant aux biotechnologies, elles sont actuellement utilisées pour enrichir les vendeurs de semences et de pesticides. Où est la recherche sur les OGM qui permettra demain de faire un maïs beaucoup moins gourmand en eau ? Si les OGM étaient avérés non toxiques et non allergéniques, et permettaient d'augmenter le bien-être, non pas du vendeur de pesticides ni du vendeur d'OGM, mais du paysan lui-même ou du consommateur, pourquoi pas ? La manipulation du vivant, pourquoi pas, mais les barrières, les seuils éthiques à ne pas franchir, bien que posés, ne sont et ne seront pas respectés. L'agroécologie est une meilleure solution sur laquelle nous devrions miser pour l'avenir.



Défilé de lycéens pour le climat dans les rues de Quimper le vendredi 15 mars 2019. Le mouvement de grève scolaire pour le climat lancé par la jeune Greta Thunberg en Suède en 2018 a trouvé écho chez la jeunesse européenne qui s'est soulevée pour faire entendre son désir d'avenir pour la planète. Invitée au sommet de la COP24, Greta Thunberg, déclarait : « [...] si les solutions au sein du système sont impossibles à trouver, nous devrions peut-être changer le système lui-même. » Depuis, elle a été proposée pour recevoir le prix Nobel de la Paix et a été nommée docteure *honoris causa* de l'université de Mons en Belgique à la rentrée 2019.

Beaucoup d'actions sont aujourd'hui portées par la société civile qui agit pour cesser d'être otage. Comment peut-on réconcilier les actions de la société civile avec la politique ?

Elles ne peuvent pas rester séparées. La politique menée actuellement ne tient pas suffisamment compte de ces aspects-là. Aujourd'hui, les mesures à prendre sont difficiles, courageuses, impopulaires. Quel va être le coût de notre inaction ? Il faut accepter de souffrir un peu ensemble, mais de souffrir petitement en rapport à la souffrance à laquelle nous nous exposons et exposons nos enfants si nous ne faisons rien. Il est possible de faire adhérer une population à cela, d'autres pays y ont réussi. Les jeunes d'aujourd'hui n'hésitent plus à nous dire : « Arrêtez de nous refiler la patate chaude ! », la jeune Greta Thunberg en est un exemple. Comment ne pas rougir devant nos enfants en voyant le monde qu'on leur lègue ? Il nous faut un monde politique qui fasse de la question écologique sa priorité, notre priorité. Aujourd'hui ce

monde n'existe pas. Edgar Morin disait à Bordeaux en 2010 que la « crise de l'humanité à l'ère planétaire [est riche] de périls mais aussi [riche] de possibilités transformatrices » et qu'elle « pourrait conduire à l'élaboration d'une véritable "politique de l'humanité" » (La Voie, voir Savoir +). Cela passe par l'éducation et il faut commencer l'écologie à l'école maternelle. Il faut expliquer aux jeunes que nous sommes dans l'écosystème, que nous en faisons partie, que nos actes ont des répercussions sur lui et les responsabiliser. Si j'étais amené à former les professeurs de SVT en écologie, je commencerais par cela. ■■

SAVOIR +

Boeuf Gilles, Toussaint Jean-François, Swynghedaw Bernard (dir.), *L'homme peut-il s'adapter à lui-même ?*, Quae, Versailles, 2012.

Debouzy Marianne, *Désobéissance civile aux États-Unis et en France, 1970-2014*, PUR, Rennes, 2016.

Morin Edgar, *La Voie : pour l'avenir de l'humanité*, Fayard, Paris, 2011.

Morin Edgar, *Les Sept Savoirs nécessaires à l'éducation du futur*, Points, Paris, 2015.

Morin Edgar, *Penser global : l'homme et son univers*, Flammarion, Paris, 2016.

Morin Edgar, *Écologiser l'homme : la nature du futur et le futur de la nature*, Lemieux, Paris, 2016.

Rabhi Pierre, *L'Agroécologie, une éthique de vie : entretien avec Jacques Caplat*, Actes Sud, 2015.

Sánchez-Bayo Francisco, Wyckhuys Kris, « Worldwide decline of the entomofauna: a review of its drivers », *Biological Conservation*, n° 232, avril 2019, p. 8-27.

Thunberg Greta, *No One is Too Small to Make a Difference*, recueil de onze discours, Penguin Books, Londres, 2019.

Yggdrasil : effondrement et renouveau, magazine-livre trimestriel, qui traite des questions liées à l'effondrement et à la résilience de notre civilisation : n° 1, juin 2019. [En ligne] <https://yggdrasil-mag.com>

DOSSIER

SCIENCES

CRÉDITS PHOTOGRAPHIQUES

15. © Michael Weberberger/ImageBROKER/Biosphoto 16, 17. © Réseau Canopé 18. © Jean-Paul Ferrero/Auscaps/Biosphoto 19, 20, 23, 24. © Réseau Canopé 25. © Pierre-Yves Bernard 27. © Agnès Stienne 28. © Réseau Canopé 29. © Granger/Bridgeman Images 31. © 2015 New Phytologist Trust 32, 33. © Francis Martin 35. © Réseau Canopé 36. Photos : © Daniel Gargani (Cirad). Montage : © Stéphane Blanc (INRA) 37. © Réseau Canopé 39. © Bruno Rapidel 41. © Réseau Canopé 43. © Ricardo Funari/Brazil Photos/LightRocket/Getty Images 44. © Réseau Canopé 46. © Frank L. Junior/Shutterstock 47. Photos : © Dominique Dénoue (INRA) 49. © Heidi Natura et Living Habitats, 1995 50. © Eden Project 51. [En haut] © Francis Cormon/hemis.fr ; [en bas] © H. Rigel/Biosphoto 52. [En haut] © Geralda/Getty Images ; [en bas] © Emma Lawrence Designs, 2019 53. [En haut] © Pierre Vernay/Biosphoto ; [en bas] © Hadyryah/Getty Images

- 14 **DYNAMIQUE DES SYSTÈMES VIVANTS**
Denis Couvet
- 18 **LES CYCLES DE VIE D'UN ÉCOSYSTÈME**
Cécile Bessou, Alexis Thoumazeau, Tiphaine Chevallier
- 22 **LE RÔLE DES SOLS DANS LES CYCLES BIOGÉOCHIMIQUES**
Pierre-Yves Bernard
- 26 **LES SOLS, DES MILIEUX FRAGILES À PROTÉGER**
Julien Demenois, Vincent Freycon
- 30 **COMMUNICATION ET RÉSEAUX SOCIAUX CHEZ LES PLANTES**
Francis Martin
- 34 **LE PHYTOBIOME ET L'AGRICULTURE DE DEMAIN**
Philippe Roumagnac, Hervé Sanguin
- 38 **ÉCOSYSTÈMES ET AGROSYSTEMES**
Éric Malézieux, Bruno Rapidel
- 42 **LES SERVICES ÉCOSYSTÉMIQUES POUR ÉVALUER NOTRE IMPACT**
Alexandra Langlais
- 46 **CULTIVER LA DIFFÉRENCE**
Cyrille Violle
- 50 **PORTFOLIO : VIVRE AVEC LE VIVANT**

DYNAMIQUE DES SYSTÈMES VIVANTS

Par Denis Couvet,
professeur au Muséum national
d'histoire naturelle, Paris

Parmi les systèmes vivants, les écosystèmes organisent les relations entre le vivant et son environnement physico-chimique, leur diversité contribuant à leur résilience.

■ LA CONVENTION POUR LA DIVERSITÉ BIOLOGIQUE définit un écosystème comme un « complexe dynamique formé de communautés de plantes, d'animaux et de micro-organismes et de leur environnement non vivant (air, terre, eau) qui, par leur interaction, forment une unité écologique fonctionnelle ». Les écosystèmes se différencient selon le climat et la végétation; déserts froids et chauds, forêts tropicales, tempérées et boréales, steppes (avec leurs variantes sèches et humides, chaudes ou froides), lacs et rivières, zones humides, criques ou mangroves, zones benthiques et pélagiques dans les mers et océans. L'échelle spatiale est le plus souvent l'hectare en milieu terrestre; elle est variable en milieu aquatique, et plus fine lorsque le milieu est composé essentiellement de micro-organismes, tels qu'une gouttelette d'eau stagnante, un sol ou un bioréacteur.

Un écosystème comprend deux grands compartiments, la **biocénose** – ensemble des êtres vivants présents – et le **biotope**, ou environnement non vivant, physico-chimique. Il n'est jamais complètement fermé, recevant *a minima* de l'énergie solaire, échangeant le plus souvent matière et organismes vivants avec ses voisins. Deux types de propriétés, l'organisation des relations entre les êtres vivants et les fonctions associées, déterminent leur état et leur dynamique.

RÉSEAU ÉCOLOGIQUE : LA BIOCÉNOSE

La biocénose s'organise selon un réseau écologique – ensemble des interactions entre êtres vivants au sein d'un écosystème –, faisant intervenir quatre types majeurs d'interaction. Omniprésent dans les écosystèmes, le **mutualisme**, ou coopération entre espèces, permet échange et création de ressources. Ainsi les lichens, associant algues et

champignons, ont permis la conquête du milieu terrestre, la création des premiers sols; les plantes à fleur alimentent les pollinisateurs en nectar et pollen, ces derniers assurant leur reproduction; les macro-organismes (plantes, animaux) hébergent de nombreux micro-organismes (de l'ordre de 10^{13} individus chez les humains) qui leur sont indispensables et avec qui ils échangent des nutriments. La **compétition**, pour diverses ressources, des nutriments à l'espace, détermine la distribution et l'évolution des régimes alimentaires et des habitats des espèces, et avantage les espèces originales. La **prédation**, consommation partielle à totale des proies par leurs prédateurs, herbivores ou carnivores, détermine les flux de matière et d'énergie, à travers des chaînes alimentaires qui se combinent dans un réseau trophique. Un type particulier de prédation est la saprophagie, ou consommation des débris animaux, végétaux ou fongiques, par les micro-organismes. Le **parasitisme** – lorsqu'une espèce se nourrit, vit et se reproduit aux dépens d'un hôte, auquel il nuit, et dont il peut influencer le comportement (syndrome du gammare fou) – constituerait la moitié des interactions dans un écosystème.

L'importance d'une espèce dans un réseau écologique est souvent liée à l'abondance de ses populations. Dynamique et stabilité d'un réseau dépendent de son architecture, de la diversité des espèces, ainsi que de la densité et de l'intensité de leurs interactions.

FONCTIONS ÉCOLOGIQUES ET SERVICES ÉCOSYSTÉMIQUES

Les fonctions écologiques représentent les flux de matière, d'énergie et d'êtres vivants au sein d'un écosystème. Elles résultent de l'activité du réseau écologique, ses relations

avec le biotope modifiant ce biotope. Un groupe fonctionnel rassemble les espèces exerçant la même fonction écologique dans un écosystème. Le milieu physico-chimique de la surface terrestre – ou biosphère – a ainsi été profondément modifié par les êtres vivants, influençant en retour leur évolution. Les sols, la composition de l'atmosphère – richesse en oxygène, raréfaction du gaz carbonique – et des océans – pH – résultent de cette « ingénierie » des écosystèmes. Les rétroactions entre biocénose et biotope sont à la fois stabilisatrices et déstabilisatrices. Ainsi, le changement climatique actuel s'accompagnerait plutôt d'interactions déstabilisatrices.

Au sein de cette vision écocentrée des écosystèmes, une vision plus anthropocentrée considère les **services écosystémiques**, qui sont les fonctions écologiques bénéficiant aux humains. On distingue généralement trois types de services : approvisionnement (agriculture, eau, ressources génétiques...), culture (espaces récréatifs, espèces emblématiques...) et, surtout, régulation environnementale, incluant les fonctions de support nécessaires au fonctionnement des écosystèmes (fertilité des sols, pollinisation, purification de l'eau et de l'air, contrôle de l'abondance des ravageurs, de l'érosion, régulation du climat, à l'échelle locale et globale...). Cette notion souligne l'importance socio-économique – négligée, voire ignorée – de ces services de régulation, les écosystèmes riches en biodiversité – forêts, zones humides, etc. – étant également riches de ces services.

VARIABLES DÉCRIVANT UN ÉCOSYSTÈME

En conséquence, divers types de variables sont nécessaires pour décrire un écosystème : l'abondance des organismes vivants et des entités physico-chimiques (nombre

Requin océanique à aileron blanc escorté par des poissons pilotes, mer Rouge, Égypte. Les interactions entre les êtres vivants d'un écosystème sont bien loin de se limiter à la prédation. Ici, les poissons pilotes profitent de l'aspiration créée par le déplacement du requin. Ce dernier n'en tire *a priori* pas de bénéfice particulier, mais n'en pâtit pas : c'est une relation de commensalisme.

d'individus, biomasse); les caractéristiques moyennes et la diversité de ces organismes et entités (masse et longévité des êtres vivants, granularité des particules du sol...) – les diversités, biologique pour la biocénose, géophysico-chimique pour le biotope ou géo-diversité, constituant la structure de l'écosystème, elles contribuent à l'adaptabilité des écosystèmes, ou résilience; enfin, les fonctions écologiques et services écosystémiques.

L'échec du projet Biosphère 2 – construction aux États-Unis, en 1987, d'un écosystème expérimental habitable par les humains, d'une superficie d'un peu plus d'un hectare –, souligne l'incomplétude de nos connaissances quant aux organismes et entités, et aux fonctions nécessaires au fonctionnement durable d'un écosystème. La liste des variables nécessaires pour décrire un écosystème de manière pertinente n'est que provisoire.

DYNAMIQUE ET RÉSILIENCE DES ÉCOSYSTÈMES

Les écosystèmes se transforment spontanément, sans intervention humaine. Les successions végétales se développent d'un sol nu (après perturbation, abandon des cultures...) vers une forêt. Si certains écosystèmes semblent stables à l'échelle humaine, tels que les forêts, tous continuent néanmoins à évoluer, sous l'influence des modifications



de biotope : perte de nutriments des sols forestiers, changement climatique, évolution des fonctions écologiques et coévolution des espèces selon le principe de la « reine rouge » – les proies tentent d'échapper à leurs prédateurs, les hôtes de résister à leurs pathogènes..., les espèces à faible capacité adaptative perdant leur place dans l'écosystème.

Selon la **théorie des cycles adaptatifs**, tout écosystème passerait par quatre stades successifs : exploitation – des ressources du biotope –, conservation, crise – ou perturbation, en raison de causes exogènes et/ou endogènes – et réorganisation – à partir de la biomasse existante, détruite lors de la crise. Les crises seraient inéluctables, la prévention de toute perturbation impossible. En conséquence, des perturbations locales éviteraient la venue inexorable d'une macroperturbation, à large échelle, après laquelle réorganisation et exploitation seraient plus lentes, les écosystèmes pauvres en espèces et en fonctions écologiques, le cycle adaptatif réduit. C'est la stratégie de gestion différenciée, ou coexistence dans un même territoire d'écosystèmes de stades différents.

BASCULEMENTS D'ÉCOSYSTÈMES

Sous l'effet de perturbations plus importantes, ponctuelles (feu, crue, aléas climatiques, prolifération d'une espèce) ou longues (déforestation ou eutrophisation progressives), notamment d'origine humaine, les écosystèmes peuvent basculer vers un état très différent. Trois types de basculement sont bien documentés : les **écosystèmes aquatiques** oligotrophes (eaux claires, riches en oxygène et en macro-espèces) vers un état eutrophe (eaux turbides, anoxiques et riches en micro-organismes), en cas d'apports importants

de nutriments, notamment phosphates, nitrates ; les **forêts tropicales** vers des steppes, en cas de feux, déforestation, réchauffement ou aridification climatique ; les **réécifs coralliaires** vers des peuplements d'algues, sous l'influence de pollutions, réchauffement, régression d'herbivores tels que les oursins. De tels basculements exigent des adaptations importantes et rapides des organismes, y compris humains, pour se maintenir au sein de l'écosystème.

La notion de **résilience** définit la capacité d'un écosystème à éviter de tels basculements, et/ou à revenir rapidement, aisément, à l'état antérieur, décrivant un nouveau et ample cycle adaptatif. La diversité biologique et géophysique d'un écosystème contribuerait à sa résilience.

ÉCOSYSTÈMES HISTORIQUES ET NOUVEAUX : PLACE DES HUMAINS

Les usages humains contrastent deux types d'écosystèmes, « historiques » et « nouveaux », se distinguant par leurs enjeux biologiques, sociaux et culturels.

Les **écosystèmes « historiques »**, associés à un impact humain faible, sont riches d'espèces anthropophobes, souvent menacées et protégées comme les grands carnivores. Ces espaces sont des réserves de biodiversité et de fonctions écologiques, et répondent à une demande culturelle, spirituelle, de nature « sauvage ».

Les **écosystèmes « nouveaux »** ont été créés par les humains : cultures, prairies, villes et villages, plantations... Ceux-ci abritent les espèces anthropophiles nécessaires à leur fonctionnement mais dont les populations déclinent (oiseaux communs, chiroptères, pollinisateurs, auxiliaires des cultures...). La restauration de leur multifonctionnalité

Schématisation théorique de la succession écologique au cours du temps.

D'après Etia Dardevet, Marion Di Liegro et Tristan Ubaldi, *Dynamique et mécanismes de la facilitation avec l'exemple des plantes nurses*, mémoire de L3 Écologie et biologie des organismes, tuteuré par Mélanie Diblais-Thibaud, université de Montpellier, 2018

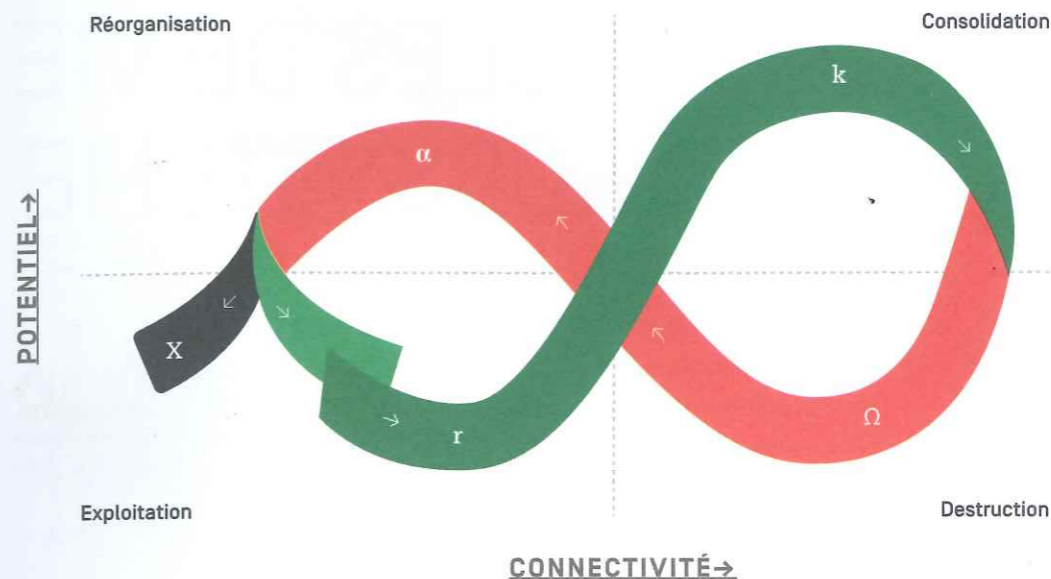
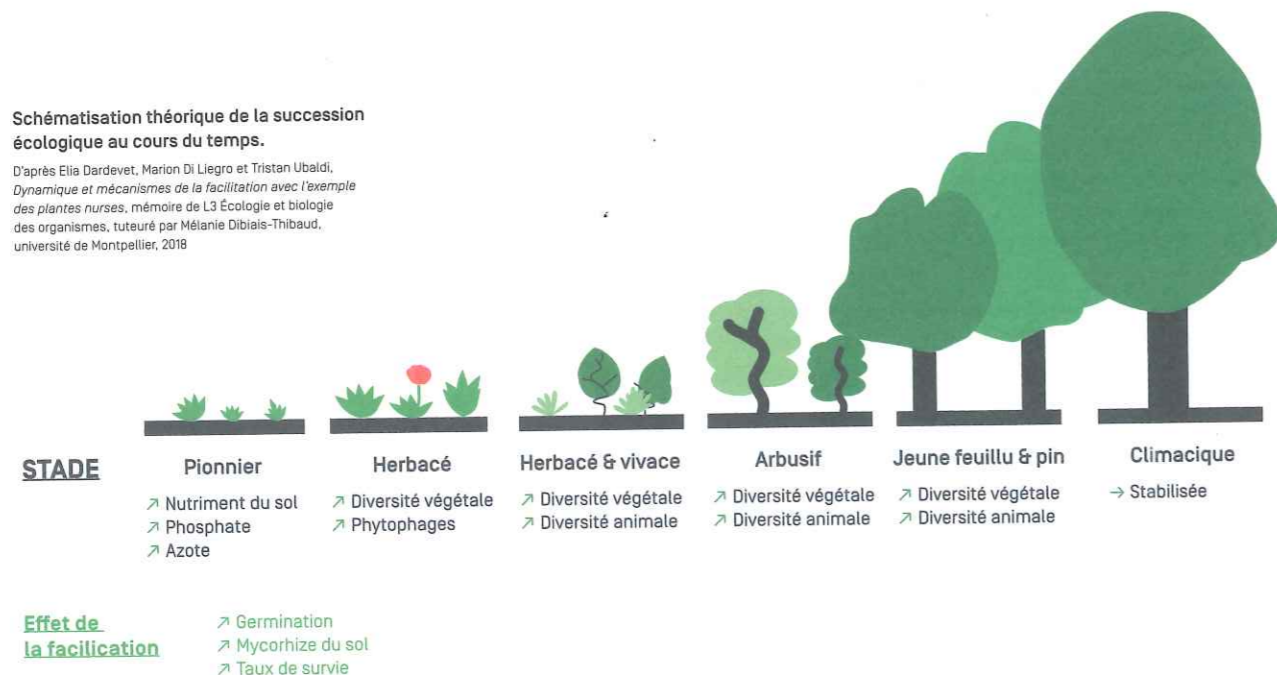


Schéma du cycle adaptatif d'un écosystème.

D'après Lance H. Gunderson, C.S. Holling, *Panarchy: Understanding Transformations in Human and Natural Systems*, © 2002, Island Press. (En ligne) <https://islandpress.org/books/panarchy>

semble pertinente, afin qu'ils combinent de nouveau fourniture de ressources naturelles et fonctions de régulation et de qualité environnementales.

La compatibilité entre production et consommation dans ces écosystèmes est fondamentale pour qu'ils soient durables. Mais elle est difficile à atteindre, à la mesure de l'empreinte écologique trop élevée des humains.

Les difficultés varient entre écosystèmes nouveaux. Villes et villages hébergent des habitants dont l'empreinte écologique est le plus souvent trop élevée. Les agroécosystèmes à rendements élevés des pays riches s'accompagnent de trop forts impacts environnementaux. Les écosystèmes objets de catastrophes environnementales, dits « fantômes et monstres de l'Anthropocène » (Fukushima, Tchernobyl, – où une riche macrofaune est maintenant présente, à la suite de réintroductions –, l'ex-mer d'Aral...), remettent en question nos capacités de gestion des écosystèmes. À l'opposé, les agroécosystèmes des pays pauvres, notamment en Asie et en Afrique, utilisant peu de fertilisants et pesticides et concernant plus de 90 % des agriculteurs de la planète (en augmentation) – agriculteurs qui souffrent souvent de malnutrition –, nous poussent à nous interroger sur le devenir de l'agriculture et des agriculteurs, dont les petites exploitations voient leur surface diminuer encore.

RÉ-ENSAUVAGEMENT D'ÉCOSYSTÈMES NOUVEAUX

La distinction entre écosystèmes historiques et nouveaux est en réalité poreuse. Des écosystèmes nouveaux, maintenant abandonnés par les humains, font l'objet de ré-ensauvagement, ou réintroduction de vie sauvage, afin de leur redonner des propriétés d'écosystème historique, démarche proposée notamment par la compensation

écologique. Un principe général serait d'assurer l'autonomie et la diversité des processus régissant la dynamique de ces écosystèmes ré-ensauvagés, contrastant avec le contrôle humain dans les écosystèmes nouveaux. Trois critères sont proposés : la **complexité trophique** – ou longueur et diversité des chaînes trophiques –, les **possibilités de dispersion** – ce qui suppose des surfaces suffisamment larges et des connexions avec des écosystèmes favorables, notamment pour les espèces au sommet des chaînes trophiques et/ou disperseuses (de graines...) –, et enfin la **survenue aléatoire des perturbations** – le rythme de ces perturbations déterminant les espèces présentes, l'aléa favorisant le maintien de la diversité spécifique et génétique.

La gestion des écosystèmes demande à prendre en compte à la fois leur diversité biophysique et sociale, ainsi que la dynamique de ces diversités. La multitude des modèles scientifiques et des institutions associées à leur gestion est un garant de leur résilience. ■■

SAVOIR +

Barnosky A. et al., « Merging paleobiology with conservation biology to guide the future of terrestrial ecosystems », *Science*, n° 355, 2017, p. 4787-4790.

Couvet Denis, Teysnière Anne, *Écologie et biodiversité : des populations aux socioécosystèmes*, Belin, Paris, 2010.

Holling Crawford Stanley, Gunderson Lance H. (dir.), *Panarchy: Understanding Transformations in Human and Natural Systems*, Island Press, Washington (DC), 2002.

Tsing Anna et al., *Arts of Living on a Damaged Planet: Ghosts and Monsters of the Anthropocene*, University of Minnesota Press, Minneapolis, 2017.

LES CYCLES DE VIE D'UN ÉCOSYSTÈME

Par Cécile Bessou,
Alexis Thoumazeau,
et Tiphaine Chevallier,
chercheurs au Cirad,
et chercheuse à l'IRD

Par essence, un écosystème est un espace de vie et d'interaction. C'est un milieu en équilibre dynamique, en reconfiguration permanente en fonction de nombreux facteurs.

■ **L'ENSEMBLE DES ORGANISMES** d'un écosystème constitue sa biodiversité. La biodiversité est régie par les nombreuses interactions entre organismes dans un contexte abiotique donné (c'est-à-dire dans un certain type de sol et de climat). Elle a un rôle fondamental dans le fonctionnement de l'écosystème. Au cœur de ce fonctionnement, les réseaux trophiques incarnent et structurent la complémentarité et l'interdépendance des cycles de vie de la matière, des éléments et des organismes.

Dans le sol, les organismes mangent de la matière organique ou se nourrissent d'organismes qui ont eux-mêmes mangé cette matière, c'est le réseau trophique du sol. Les micro-organismes, bactéries et champignons, sont les principaux consommateurs primaires. Ils sont à leur tour mangés par des protozoaires, des nématodes, etc., eux-mêmes mangés par leurs prédateurs. Ce réseau trophique, entretenu par les débris de plantes mortes, est essentiel pour la croissance des plantes. L'activité des organismes du sol contribue aussi à sa structure (par exemple galeries de termites, turricules de vers de terre ou filaments de champignons). Celle-ci



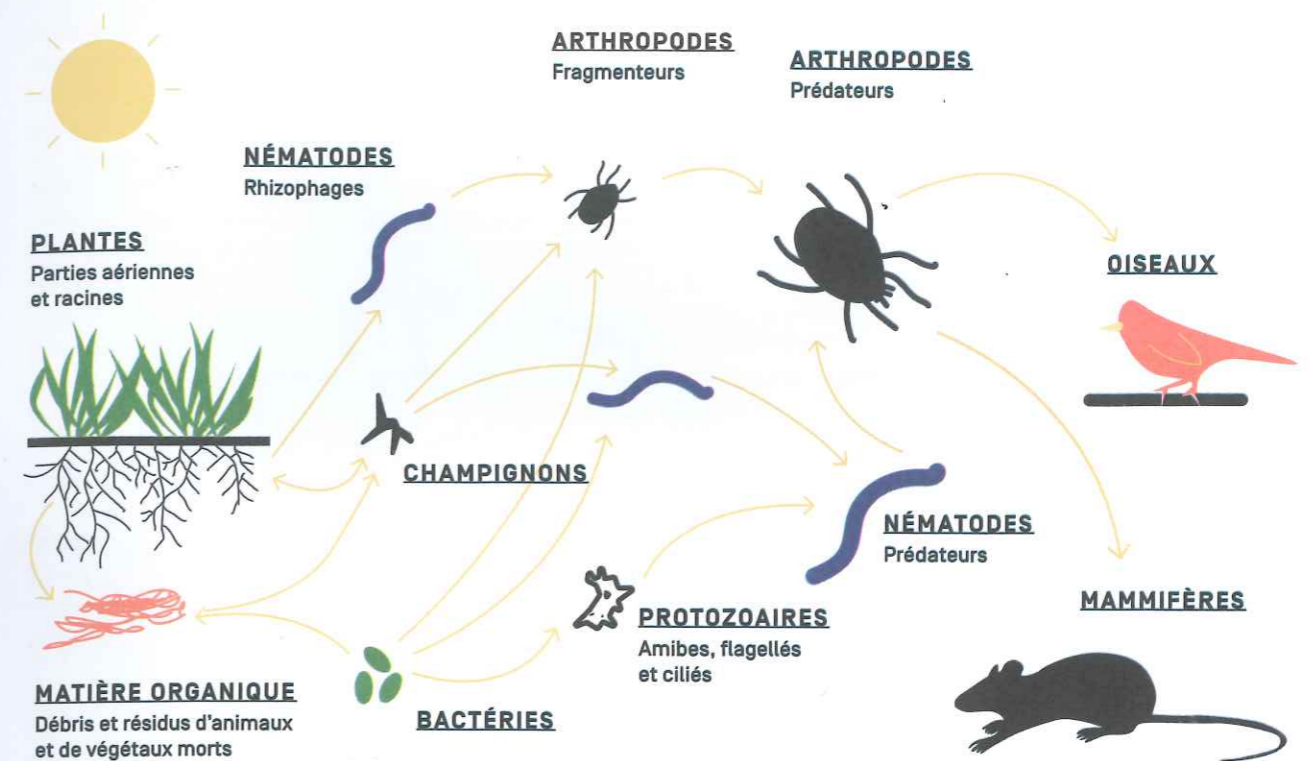
Coupe transversale de sol :
les vers de terre aèrent le sol
en y creusant des galeries.

joue un rôle primordial dans la pénétration des racines dans le sol. Elle détermine également les quantités d'air et d'eau stockées dans le sol et disponibles pour les racines des plantes. La diversité des organismes du sol et celle des plantes est ainsi connectée.

LA BIODIVERSITÉ AU CŒUR DU FONCTIONNEMENT DE L'ÉCOSYSTÈME

Le rôle de la biodiversité dans le fonctionnement des systèmes a souvent été négligé ou restreint à des espèces emblématiques qui ne sont pas toujours représentatives de la complexité des systèmes. Dans le sol, la biodiversité invisible à l'œil nu est très importante et encore très peu renseignée. Un gramme de sol pourrait contenir plusieurs milliers d'espèces bactériennes (Blanchart et al., voir Savoir +). Au-delà de la compréhension et de la description de l'ensemble des espèces présentes dans un écosystème (méthodes taxonomiques : on cherche qui est là), il semble important d'évaluer le rôle de chacune (méthodes fonctionnelles : on se demande ce qu'elles font). Les méthodes fonctionnelles permettent d'étudier le rôle de la biodiversité dans les cycles de la matière et des éléments du sol. Mais les mécanismes impliqués restent encore mystérieux. Le nombre d'espèces, leur complémentarité et la facilitation – ou « l'entre-aide » – font partie des mécanismes explorés qui pourraient permettre de mieux comprendre et de favoriser la résilience des écosystèmes.

Les principales perturbations engendrées par les activités agricoles peuvent avoir des conséquences marquées sur la biodiversité. Les réseaux trophiques peuvent être



La complexité
du réseau trophique du sol.

altérés et les cycles déséquilibrés. Les pratiques de labour, par exemple, affectent l'abondance et la diversité des organismes du sol. Les vers de terre y sont très sensibles. Leur rôle clé dans le cycle de la matière organique du sol est sévèrement perturbé par des pratiques agricoles intensives.

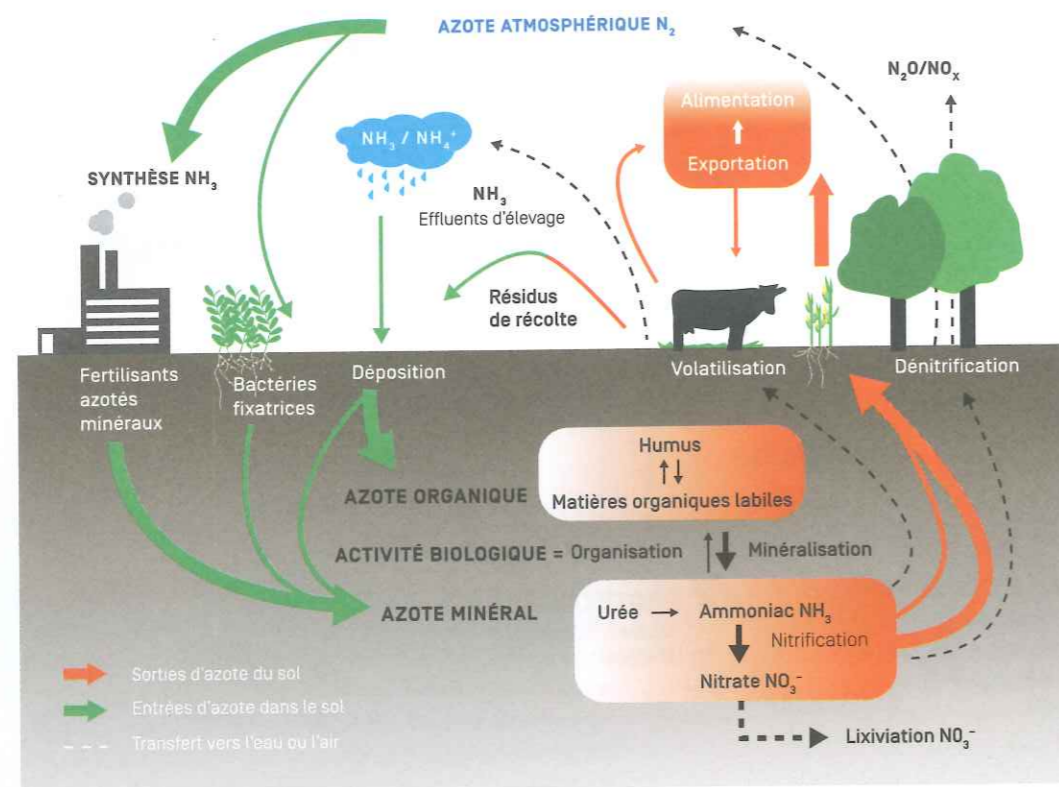
Au-delà de la perte de biodiversité au sein d'un même réseau trophique (échelle horizontale), de nombreux effets en cascade peuvent se répercuter sur l'ensemble des interactions entre ces réseaux (échelle verticale). Les vers de terre, toujours, contribuent au régime alimentaire de 175 autres espèces de mammifères, oiseaux, reptiles et amphibiens en France (Decaëns et al., voir Savoir +). Leur diminution dans les sols affecte donc le comportement de nombreux autres organismes prédateurs. La préservation de la biodiversité est ainsi l'une des clés de voûte du maintien d'un réseau d'interactions entre organismes, donc de nombreux cycles et dynamiques de l'écosystème.

LES CYCLES NATURELS, DES ÉQUILIBRES FRAGILES

Les principaux éléments, sources de vie pour l'ensemble des organismes de l'écosystème, sont le carbone (C), l'azote (N), l'oxygène (O) et l'hydrogène (H). Les cycles de ces éléments

sont liés et dépendent à la fois des interactions entre les acteurs endogènes relevant de sa biodiversité et des facteurs exogènes liés à l'activité humaine.

Dans les systèmes naturels à l'équilibre, les cycles des éléments sont généralement bouclés, les stocks stables. Les éléments sont utilisés et recyclés sans grande perte. Le développement des organismes et leurs niveaux d'activité sont calibrés en fonction des éléments disponibles, c'est-à-dire que les intrants propres au système (par exemple déposition d'azote, recyclage interne d'éléments...) sont nécessaires et suffisants. Les organismes, donc les flux, s'autorégulent. Les pertes, flux sortants du système, sont réduites voire nulles. On définit comme facteur limitant, l'élément qui conditionne cet équilibre, soit la vitesse et l'ampleur des flux du système. Ce facteur limitant peut être la température, le complexe argilo-humique ou bien d'autres encore, voire une combinaison de facteurs corrélés tels que les teneurs en C et N. Le ratio C/N de la matière organique d'un sol est un indicateur communément utilisé pour caractériser son activité biologique. Les organismes dégradant la matière organique utilisent ces deux éléments selon un rapport qui leur est spécifique, telle une signature. Une matière organique sera d'autant plus facilement dégradée qu'elle contient un rapport C/N proche de celui des organismes du sol. Si ce rapport est très supérieur, l'azote devient un facteur limitant (faim d'azote) et les organismes puisent dans les réserves du sol pour trouver l'azote minéral nécessaire à leur développement : on parle d'**immobilisation**. La décomposition de la matière organique et la minéralisation de l'azote sont



limitées. Dans le cas contraire, l'azote organique est **minéralisé** et mis à disposition des plantes pour leur développement ou perdu vers l'environnement.

Les êtres humains perturbent les écosystèmes, généralement pour produire des biens et services. Les différentes pratiques de gestion de cette production ont un impact sur les flux de matière qui entrent, circulent et sortent de l'écosystème. L'exemple du cycle de l'azote illustre à la fois la complexité de l'équilibre des cycles et des écosystèmes, et les influences directes et indirectes que peuvent avoir sur eux ces perturbations humaines.

LE RÔLE DE L'AZOTE

L'azote est essentiel à la vie, pour fabriquer les acides aminés puis les protéines. La principale source d'azote est l'air, N_2 . Cet azote atmosphérique est fixé par des bactéries qui peuvent vivre en symbiose avec des plantes, notamment les légumineuses, qui bénéficient alors directement de cet approvisionnement. Qu'il provienne directement de l'atmosphère ou de la matière organique en décomposition, l'azote est utilisé par les organismes du sol via les processus d'immobilisation et de minéralisation. L'azote minéral est une source de constituants pour la synthèse des protéines (anabolisme), mais, pour certains organismes, il peut également être une source de pouvoir oxydant pour fournir de l'énergie (métabolisme) en conditions d'anaérobiose.

C'est le cas du processus de dénitrification réalisé par des micro-organismes dits dénitrifiants qui utilisent les nitrates (NO_3^-). Le processus de nitrification, réalisé généralement par d'autres organismes et en condition d'aérobiose, transforme l'azote ammoniacal (NH_4^+) en nitrates (NO_3^-). Selon les conditions d'oxygénation et les éléments disponibles, ces deux processus antagonistes peuvent émettre plus ou moins de protoxyde d'azote (N_2O) vers l'atmosphère. D'autres processus strictement physico-chimiques, la déposition et la volatilisation, participent également au **cycle de l'azote**. L'ensemble des processus et leur équilibre définissent les formes d'azote disponibles pour les plantes et, par effet de cascade, pour les animaux qui mangent les plantes et qui, en retour, réinjectent de l'azote via les urines.

Au niveau du cycle global, une petite part seulement de l'azote s'accumule dans l'écosystème tandis que l'essentiel retourne dans l'atmosphère, y compris l'azote temporairement stocké dans les aliments (Galloway et al., voir Savoir +). En revanche, l'intervention humaine dans les agrosystèmes via l'apport d'engrais azotés influence fortement le cycle de l'azote et peut notamment induire des pertes d'azote dans l'air ou l'eau. En accélérant la fixation de l'azote atmosphérique via le procédé Haber-Bosch pour synthétiser des engrais azotés – au départ de l'ammoniac (NH_3), par hydrogénation de l'azote atmosphérique (N_2) avec du dihydrogène (H_2) –, la révolution verte a favorisé les apports d'azote dans les agrosystèmes. Ceux-ci s'avèrent utiles dans certains contextes où l'azote est limitant, mais ils peuvent

également, s'ils sont mal gérés, entraîner des déséquilibres des cycles et des pertes vers l'environnement. Ces pertes ont des impacts, tels que celui des émissions de N_2O au fort pouvoir de réchauffement climatique (presque 300 fois plus fort que celui du CO_2 sur 100 ans). De nos jours, les émissions de N_2O contribuent à hauteur de 11 % des émissions globales de gaz à effet de serre de l'agriculture (WRI, voir Savoir +). L'influence humaine sur les pertes vers l'environnement est également indirecte à plusieurs niveaux. Dans le cas du N_2O , par exemple, le tassement lié à la mécanisation modifie l'aération des pores du sol, donc influence l'alternance des processus de nitrification et dénitrification à l'origine de ces émissions. D'autre part, selon une approche cycle de vie à l'échelle de la filière, la production et le transport de ces engrais contribuent également aux émissions globales.

L'impact des pratiques agricoles dans le fonctionnement des agrosystèmes est très hétérogène et dépend du contexte. Il peut être notamment accentué dans des régions tropicales, où les cycles des éléments sont stimulés par des températures et une humidité propices à l'activité biologique. Par ailleurs, le risque d'érosion lié à la mise en culture est très important dans ces mêmes régions où les précipitations peuvent être fréquentes et particulièrement intenses. Il est alors important de bien comprendre l'impact des pratiques sur l'intensité des cycles des agrosystèmes dans un contexte donné pour pouvoir en limiter les conséquences négatives. Les cycles et interactions peuvent aussi être intensifiés de manière bénéfique, c'est notamment l'un des objectifs de la mise en place de pratiques agroécologiques.

L'AGROÉCOLOGIE, CULTIVER LES CYCLES NATURELS POUR MIEUX PRODUIRE

Les pratiques agroécologiques s'appuient sur les interactions existantes entre les organismes et leur environnement pour assurer une production des agrosystèmes respectueuse de l'environnement.

Favoriser les cycles des éléments en évitant les intrants externes grâce au recyclage des résidus de culture est un des leviers fondamentaux de l'agroécologie. Le recyclage en boucle permet de mettre à profit le principe de thermodynamique de conservation de l'énergie, et ainsi de maximiser la réutilisation des nutriments, de l'eau et de minimiser les risques de perte. Le compostage est un processus de transformation des résidus organiques visant à produire un amendement organique concentré et stable. Ce processus fait naturellement intervenir divers organismes. Il peut être optimisé par l'agriculteur grâce à l'aération et l'arrosage favorisant cette activité biologique. Dans la filière palmier à huile, par exemple, le compost est produit à partir des résidus après l'égrenage des régimes et l'extraction de l'huile. Il peut être arrosé en recyclant également les effluents liquides bruts de l'huilerie. D'un point de vue cycle de vie, ce processus permet de réduire à la fois les impacts liés au traitement

des résidus (c'est-à-dire les émissions de gaz à effet de serre durant le traitement anaérobique des effluents), ceux liés à la production d'une partie des engrais synthétiques substitués et ceux liés au transport. En effet, le compost concentré est moins volumineux que les résidus non compostés par équivalent nutritionnel pour le sol. Au-delà du recyclage strict des éléments, l'apport de matière organique favorise le développement des organismes du sol impliqués dans sa décomposition. L'intégration de cette matière dans la matrice du sol en améliore également la structure.

Des pratiques agroécologiques visent également l'augmentation de la biodiversité dans les parcelles cultivées. Les associations végétales (légumineuses et céréales ; arbres et cultures annuelles via l'agroforesterie) sont notamment encouragées. Ces systèmes d'association permettent de profiter du rôle écologique de chaque espèce ou individu intégré dans l'agrosystème, tout en le renforçant. Dans le cas d'un système agroforestier associant arbres et cultures annuelles, le cycle de l'eau, par exemple, peut être optimisé, particulièrement dans des zones arides. D'une part, l'arbre peut puiser l'eau des horizons souterrains. D'autre part, la litière ainsi que l'ombrage de l'arbre peuvent limiter l'évaporation et rendre l'eau plus facilement disponible pour les cultures annuelles associées.

UNE DIVERSITÉ ENCORE À EXPLORER

Les écosystèmes sont régis par de nombreuses interactions entre les organismes qui organisent les cycles de la matière. La biodiversité a un rôle clé dans la mise en place et la régulation de ces interactions. Elle joue également un rôle dans le maintien des interactions et la résilience des écosystèmes face aux perturbations. Une connaissance fine des processus sous-jacents est cruciale afin de pouvoir proposer des pratiques efficaces. De nombreuses pistes agroécologiques font l'objet de recherche pour mieux comprendre le fonctionnement des écosystèmes et les leviers d'action. Ces travaux et le besoin en connaissances dépassent l'échelle de la parcelle agricole, car l'agrosystème est aussi en interaction avec les écosystèmes environnants au niveau du paysage, voire au-delà. ■■

SAVOIR +

Blanchart Éric, « Quels bio-indicateurs pour une gestion durable des sols ? », in Collectif, *Bio-indicateurs pour la caractérisation des sols*, Ademe, Paris, 2012, p. 31-38.

Decaëns Thibaud, Jiménez Juan José et al., « The values of soil animals for conservation biology », *European Journal of Soil Biology*, n° 42, novembre 2006, p.23-38.

Galloway James N., Aber John D. et al., « The nitrogen cascade », *BioScience*, n° 53, vol. 4, 2003, p. 341-356.

WRI, *Better Growth, Better Climate. The Global Commission on the Economy and Climate*, World Resources Institute, Washington DC, 2014.

LE RÔLE DES SOLS DANS LES CYCLES BIOGÉOCHIMIQUES

Par Pierre-Yves Bernard, enseignant-chercheur en agronomie, UniLaSalle, campus de Rouen, unité AGHYLE UP 2018.C101, équipe Agroécologie

Le sol, considéré comme un des réservoirs majeurs de biodiversité, héberge une richesse exceptionnelle d'organismes vivants assurant un rôle fondamental dans les cycles biogéochimiques.

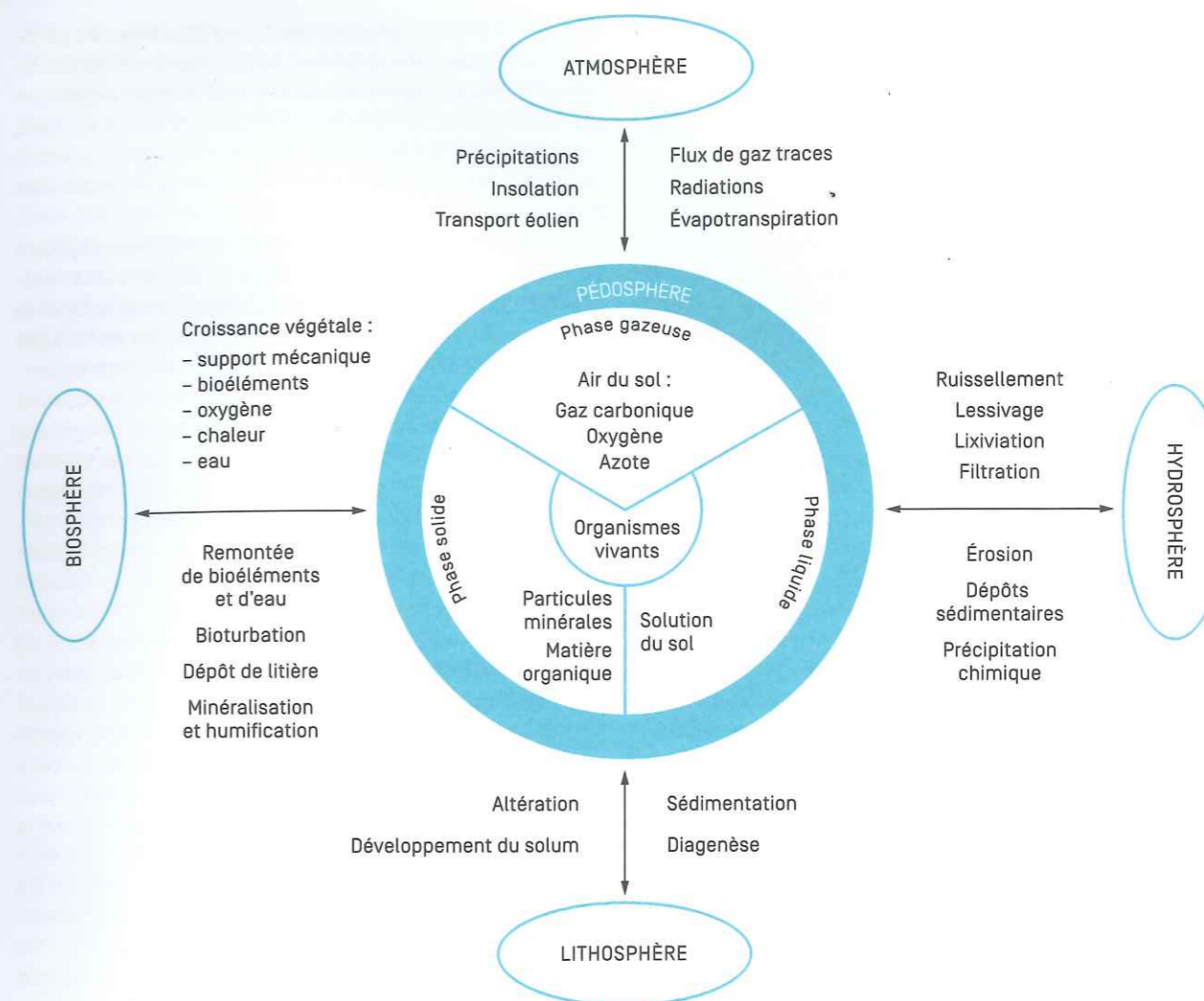
■ LE SOL correspond à la couche superficielle des surfaces continentales. Il se forme par l'altération de la roche sous-jacente, sous l'action combinée du climat et des organismes vivants. Son volume s'étend de la surface de la terre jusqu'à la roche altérée, dont il se distingue par l'association intime de constituants minéraux et organiques et par l'intense activité biologique qui y règne. Sa formation résulte d'une évolution lente, dont la durée varie de plusieurs millénaires à plusieurs dizaines de millénaires. Le sol est de ce fait une ressource considérée comme non renouvelable à l'échelle de temps d'une vie humaine.

COMPOSITION ET FONCTIONS DU SOL

Pour les pédologues, le sol représentant un volume largement plus étendu selon la direction horizontale que verticale, il est habituel de parler de « **couverture pédologique** ». En France métropolitaine, cette couverture présente des épaisseurs variables de l'ordre de quelques décimètres à quelques mètres, alors qu'elle peut atteindre plusieurs dizaines de mètres en conditions tropicales. Le sol est organisé en couches plus ou moins distinguables à l'œil nu, appelées « **horizons** ». Sur un profil de sol, les horizons se distinguent les uns des autres par leur couleur, leur texture et leur structure. Celle-ci est caractérisée par l'organisation des fragments de sol, les « **agrégats** », qu'il est possible plus ou moins facilement d'individualiser à la main et dont la taille varie du millimètre au décimètre. Ces agrégats résultent de l'action combinée du climat et de l'activité biologique du sol (et des pratiques culturales dans le cas de l'horizon travaillé des sols agricoles).

Les agronomes s'intéressent plus particulièrement à la partie supérieure de la couverture pédologique, très importante pour le développement et la croissance des plantes. Pour eux, le sol est un milieu poreux déformable. En effet, sa phase solide, la terre, comprend un réseau de pores dans lequel se déplacent un liquide, la solution du sol, constituée d'eau et de substances minérales et organiques dissoutes, ainsi qu'un ensemble de constituants gazeux formant l'air du sol. Les parts respectives de l'air et de l'eau sont soumises à de grandes fluctuations, sous l'action des plantes et du climat qui engendrent un cycle continu d'évaporation et de réhumectation du sol. Le volume de la porosité connaît lui aussi des fluctuations sous l'effet des pratiques culturales. Ainsi le tassement, en déformant le sol, détruit sa porosité. Le travail du sol a pour but de la recréer, mais l'activité de la faune (vers de terre) et le climat contribuent aussi à régénérer les pores détruits.

La phase solide du sol est constituée, à plus de 90 % en masse, de particules minérales de tailles variables et de diverses natures minéralogiques. De la distribution des tailles de ces particules, qui s'échelonnent du micromètre à plusieurs millimètres (en excluant graviers et cailloux), dépendent beaucoup de propriétés des sols. Trois catégories de particules ont été définies sur la base de leur diamètre apparent : les argiles (< 2 µm), les limons (de 2 à 50 µm) et les sables (de 50 à 2 000 µm, soit 2 mm). La proportion respective des particules dans ces trois classes définit la **texture**, ou composition granulométrique, d'un sol. Il ne faut pas confondre la texture avec la **structure** du sol, qui est le mode d'assemblage de ses constituants solides. La structure peut être plus ou moins fragmentaire, plus ou moins compacte. Cette organisation de la phase solide varie au cours du temps et détermine la porosité structurale du sol, qui est



La complexité externe et interne du sol.

D'après Jean-Michel Gobat, Michel Aragno et Willy Matthey, *Le Sol vivant : bases de pédologie, biologie des sols*, Presses polytechniques et universitaires romandes, 3^e éd., 2010.

plus ou moins développée et donc plus ou moins favorable au développement des plantes cultivées.

Le sol est également composé de constituants organiques allant de fragments de végétaux ou d'animaux morts – la matière organique dite fraîche ou peu évoluée – à des biomolécules complexes, qui constituent la fraction stable de la matière organique des sols, liée à la fraction argileuse pour constituer le complexe **argilo-humique**. La quantité de matières organiques est très variable selon le type et l'occupation du sol (prairie, type de culture...) et selon les pratiques culturales (apports de composts, de fumiers, restitutions ou non des pailles...). Dans un sol cultivé, la teneur en matières organiques stables représente de 2 à 5 % en masse et varie lentement sur plusieurs années. Il est préférable de parler des matières organiques du sol au pluriel, car

leur diversité est considérable. Contrairement à la fraction minérale, la fraction organique est en perpétuel renouvellement : ce compartiment est en effet à la fois augmenté tous les ans (par les apports d'amendements organiques, la décomposition des racines ou celles des pailles...) et diminué un peu tous les ans, une fraction de la matière organique stable étant décomposée par les micro-organismes du sol.

Les sols cultivés assurent de nombreuses fonctions qui sont à la base de services écosystémiques. Parmi ces fonctions, plusieurs sont essentielles : la fonction de support physique pour les plantes ; la fonction biologique et biogéochimique, le sol étant à la fois un habitat pour une très grande diversité d'organismes et un acteur des cycles biogéochimiques ; la fonction alimentaire, car le sol est un réservoir et un lieu de transformation des matières organiques et minérales, qui fournit aux plantes l'eau et les éléments minéraux nécessaires à leur croissance ; la fonction de régulation des échanges et des flux, car le sol est un système poreux échangeant avec l'atmosphère et régulant les flux hydriques et gazeux qui le traversent.

LA BIOMASSE DU SOL ET LE RECYCLAGE DE LA MATIÈRE VIVANTE

Les organismes vivants, qui constituent la biomasse du sol, jouent un rôle très important pour la réalisation de ces fonctions. Cette biomasse comprend la faune du sol, les micro-organismes et les racines des végétaux. Habituellement, on distingue au sein de la **faune du sol** : la microfaune, de longueur inférieure à 0,2 mm, correspond aux protozoaires et nématodes qui vivent dans l'eau contenus dans la porosité des sols ; la mésofaune, de longueur comprise entre 0,2 et 4 mm, comprend principalement des microarthropodes (acariens, collemboles, diploures, protoures, petits myriapodes...); la macrofaune, de longueur comprise entre 4 et 80 mm, correspond à une très grande diversité d'organismes : vers de terre, insectes, myriapodes, mollusques et araignées...; la mégafaune, de longueur supérieure à 80 mm, regroupe les vertébrés, reptiles et amphibiens utilisant le sol comme habitat.

Les micro-organismes, dont l'ensemble forme la **microflore du sol**, représentent une part très importante de la biomasse totale. Ils sont caractérisés par une extrême diversité taxonomique et fonctionnelle : bactéries, actinomycètes, champignons, algues et enfin archées et virus, moins bien connus que les précédents. Les bactéries sont les micro-organismes les plus abondants, au point qu'elles représentent plus de 10 millions d'individus par gramme de sol sec, puis viennent les champignons et actinomycètes avec environ 1 million d'individus par gramme de sol sec.

Les bactéries jouent un rôle très important dans les biotransformations des matières organiques et dans les processus biogéochimiques du sol. Elles interviennent ainsi dans de nombreux cycles : celui du carbone (C), mais aussi de l'azote (N) et du phosphore (P), deux nutriments indispensables à la croissance des plantes. Les bactéries, ainsi que les champignons et actinomycètes, dégradent les matières

organiques pour assurer leur propre métabolisme. En particulier, elles sont responsables du processus de **minéralisation**, à l'issue duquel une partie de la matière organique est décomposée en éléments minéraux simples (nitrate, phosphate, etc.), nécessaires à la croissance des plantes qui ne peuvent pas absorber par leurs racines de molécules organiques.

Certaines bactéries spécifiques sont également capables de transformer l'azote atmosphérique (N₂) en azote assimilable par les plantes. Cette transformation est la fixation biologique de l'azote et correspond à la fixation symbiotique lorsqu'elle est permise par l'association des fabacées (légumineuses) avec des bactéries du genre *Rhizobium*. Cette fixation symbiotique est à l'origine du fort intérêt agronomique des légumineuses au sein des rotations culturales ou des prairies.

Les bactéries produisent également de nombreuses enzymes participant à des biosynthèses dans le sol. Présentes dans la solution du sol, ces enzymes catalysent diverses réactions permettant d'associer des biomolécules élémentaires héritées de la décomposition de la biomasse du sol (sucres simples, acides aminés, peptides, lipides...) en molécules organiques de plus en plus complexes jusqu'à former des structures supramoléculaires. L'ensemble de ces biotransformations successives est classiquement appelé « processus d'humification » et les structures organiques formées, « l'humus du sol ». Cette fraction donne aux horizons de surface leur couleur foncée et représente la fraction stable et la part la plus importante des matières organiques du sol. Enfin, cette fraction forme avec les argiles, le complexe argilo-humique (ou complexe adsorbant), mentionné plus haut, qui participe aux principales propriétés du sol (capacité de rétention en eau, stabilité structurale, capacité d'échange de cations...).

Les champignons du sol interviennent également dans la minéralisation de la matière organique, en particulier des composés très riches en carbone telles que la cellulose et

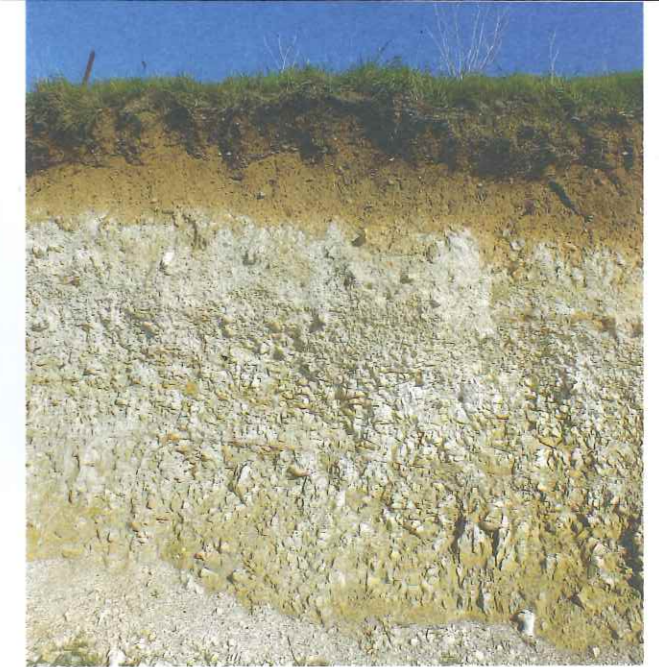
la lignine, et participent également à la cohésion du sol. De plus, certains champignons peuvent réaliser des associations symbiotiques avec les racines des plantes en formant des **mycorhizes** (voir les articles « Communication et réseaux sociaux chez les plantes » p. 30 et « Le phytobiome et l'agriculture de demain » p. 34). Dans ces associations, très répandues, car concernant un très grand nombre de végétaux, le mycélium du champignon mycorhizien permet d'augmenter de manière considérable le volume de sol exploré par les racines et améliore le transfert d'eau et d'éléments minéraux vers les plantes.

La faune du sol a une action complémentaire à celles des micro-organismes, en fragmentant les matières organiques, en particulier les résidus végétaux de la litière, et en les mettant au contact des micro-organismes. La pédofaune a aussi une action marquée sur l'activité des microorganismes du sol par la prédation, l'accélération du *turn-over* microbien et le relargage dans le sol des nutriments contenu dans la biomasse microbienne. Les « bâtisseurs » du sol que sont les vers de terre, notamment, participent à la structuration des sols par la formation des agrégats, à la circulation de l'eau et de l'air ainsi qu'à la dynamique des éléments chimiques. Ingérant de grande quantité de terre qu'ils ramènent en surface, ils assurent ainsi un brassage important entre les matières organiques et minérales.

FONCTIONNEMENT BIOLOGIQUE DES SOLS ET TRANSITION AGROÉCOLOGIQUE

Tous ces organismes ne sont pas présents de manière homogène dans le sol. Ils sont beaucoup plus abondants dans une zone spécifique appelée « **rhizosphère** », qui correspond au volume de sol situé autour des racines vivantes et soumis à leurs activités. Elle intéresse les scientifiques depuis le début du xx^e siècle, car c'est une interface, une zone d'échanges et d'interactions biologiques entre plantes et micro-organismes. Il est ainsi admis que les plantes ont la capacité d'influencer la rhizosphère pour gouverner la disponibilité des éléments nutritifs par la modification des processus biogéochimiques. Les racines des plantes peuvent par exemple libérer des exsudats racinaires, riches en C, qui vont stimuler les activités microbiennes et, indirectement, la disponibilité pour les plantes d'éléments tels que N et P.

En France comme dans d'autres pays pratiquant une agriculture intensive, se pose de la question de la transition agroécologique des systèmes de production agricole, qui correspond à la volonté de concilier production et environnement, c'est-à-dire de produire autant tout en consommant moins d'intrants, notamment de produits phytosanitaires et de fertilisants azotés de synthèse. Dans ce cadre, la composante vivante du sol est appelée à jouer un rôle majeur dans la transition agroécologique. Ainsi, par exemple, optimiser voire intensifier les processus rhizosphériques doit permettre de mieux utiliser les ressources minérales du sol



Coupe d'un sol (Normandie, France) avec une partie sombre, les horizons organo-minéraux, et une partie plus claire, la roche sous-jacente (craie).

et donc d'économiser l'emploi d'engrais. Les bactéries fixatrices d'azote, qui vivent en symbiose avec les légumineuses, doivent contribuer à diminuer l'usage d'engrais azotés de synthèse, dont la production est très coûteuse en énergie fossile. En favorisant la diversité de la faune du sol, on aide également à la mise en place de réseaux trophiques au sein desquels des insectes auxiliaires assurent le contrôle d'un certain nombre de bioagresseurs des plantes cultivées.

Étant donné que, selon la FAO (Organisation des Nations unies pour l'alimentation et l'agriculture), 95 % de l'alimentation mondiale repose directement ou indirectement sur les sols, et que la population mondiale devrait continuer de croître durant tout le xx^e siècle, la question de la compréhension et de l'intensification du fonctionnement biologique des sols reste cruciale. Elle représente un enjeu fort pour les acteurs de la recherche et du développement agricole désireux de concevoir des agrosystèmes à bas niveau d'intrants mais performants grâce à une meilleure prise en compte des sols en tant que milieux vivants. ■■

SAVOIR +

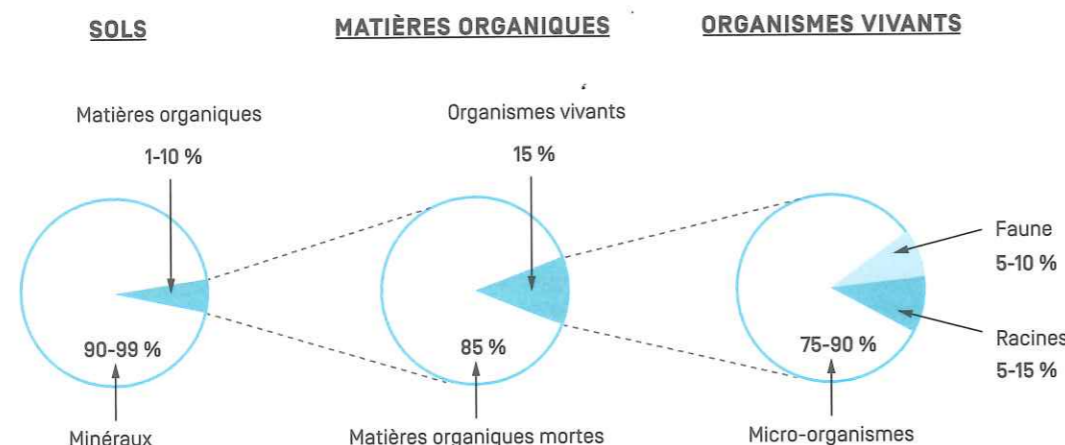
Calvet Raoul, Chenu Claire, Houot Sabine, *Les Matières organiques des sols : rôles agronomiques et environnementaux*, France Agricole, Paris, 2015.

Colomb Bruno [dir.], *Le Guide de la fertilisation raisonnée*, France Agricole/Comifer, Paris, 2017.

Girard Michel-Claude, Walter Christian et al. [dir.], *Sols et environnement*, Ademe/Dunod, Paris, 2011.

Gobat Jean-Michel, Aragno Michel, Matthey Willy, *Le Sol vivant : bases de pédologie, biologie des sols*, Presses polytechniques et universitaires romandes, Lausanne, 2010.

Ruellan Alain, *Des sols et des hommes : un lien menacé*, IRD, Bondy, 2010.



Proportions approximatives en masse des constituants organiques dans les sols cultivés.

D'après Raoul Calvet, Claire Chenu, Sabine Houot, *Les Matières organiques des sols : rôles agronomiques et environnementaux*, France Agricole, 2^e éd. 2015.

Source : Van-Camp L., Bujarrabal B., Gentile A. R. et al., « Organic Matter », in ECEC Agency [ed.], *Reports of the Technical Working Groups Established under the Thematic Strategy for Soil Protection*, vol. III, Luxembourg, Office for Official Publications of the European Communities, 2004.

LES SOLS, DES MILIEUX FRAGILES À PROTÉGER

Par Julien Demenois
et Vincent Freycon,
chercheur en écologie,
et chercheur en pédologie,
Cirad, Montpellier

Support de la vie terrestre, les sols sont largement ignorés par nos sociétés contemporaines et s'en trouvent aujourd'hui menacés.

■ **LES SOLS SE FORMENT NATURELLEMENT** sous l'action de l'eau, de l'air, de la vie animale et de la vie végétale par différents processus : altération de la roche, humification de la litière, transports de matière. La vitesse moyenne de formation d'un sol est très lente (en France, entre 0,1 à 0,02 mm/an, selon le climat et la roche ; au niveau mondial, environ 0,024 mm/an). En moyenne, 40 000 ans sont nécessaires pour former un sol d'un mètre d'épaisseur. Les sols devraient donc être considérés, à l'échelle humaine, « au moins comme une ressource non renouvelable, si ce n'est comme un patrimoine » (Coquet et Ruellan, p. 31, voir Savoir +).

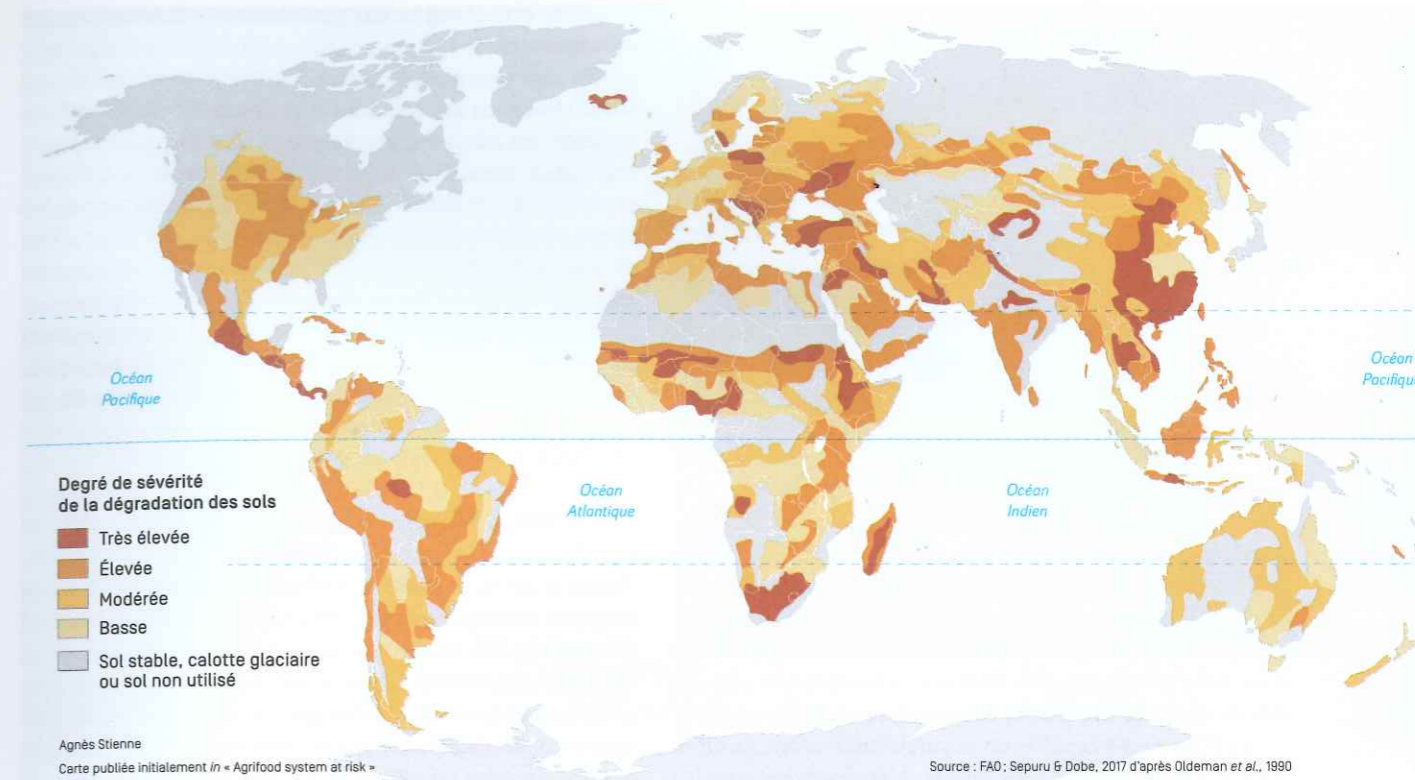
Le sol assure différentes fonctions. Il nourrit le monde et fournit des matériaux. C'est un composant fondamental du cycle des eaux continentales (stockage, épuration...) et de celui des principaux éléments (carbone, azote...). C'est aussi un réservoir de biodiversité, un livre d'histoire du climat et de l'homme (archéologie). Dans certaines civilisations, il est également considéré comme un objet culturel et religieux. Il fournit donc des biens et des services écosystémiques cruciaux pour le bien-être humain.

DÉGRADATION DES SOLS

Tout usage du sol par les sociétés humaines le modifie dans ses fonctions, positivement ou négativement. On parle de dégradation d'un sol quand la transformation de ses propriétés (physiques, chimiques, biologiques) entraîne une diminution de sa capacité à fournir des biens et services (perte de productivité et de biodiversité...).

Au moins un milliard d'hectares de sols sont affectés par des dégradations de différents types. L'érosion du sol consiste en une perte de terres provoquée par la pluie (érosion hydrique) ou par le vent (érosion éolienne). L'érosion hydrique touche 20 % des sols d'Europe et est favorisée par le ruissellement de l'eau à la surface. Elle est d'origine naturelle mais est fortement accentuée par l'homme et ses pratiques agricoles, notamment quand le sol est nu, non protégé par un couvert végétal. Elle est de l'ordre de 0,1 à 2 mm/an en zone tempérée et peut atteindre 20 mm/an dans la zone tropicale qui est soumise à des pluies intenses. Elle conduit à une diminution de l'épaisseur du sol et favorise les inondations en aval de l'endroit où elle a lieu. Le massif de l'Aigoual (Gard) a ainsi été reboisé à la fin du XIX^e siècle suite aux inondations répétées dans les villes en aval. L'érosion éolienne touche des surfaces plus modestes (0,8 % de l'Europe par exemple), mais peut être spectaculaire ou dramatique, tels les épisodes de tempête de sable dans le Sahel, ou l'épisode du *Dust Bowl* (tempête de poussière) au début du XX^e siècle, restitué par John Steinbeck dans *Les Raisins de la colère* (1939).

L'artificialisation des sols est due au développement de l'urbanisation (étalement urbain et extension périurbaine), des infrastructures (autoroutes...), des mines, etc. Elle se fait principalement au détriment des terres agricoles. En France, lors des dernières décennies, son rythme moyen a été de 60 000 ha/an, soit la superficie moyenne d'un département français en 10 ans. En 2014, suivant les méthodes d'estimation, les sols artificialisés (ni à usage agricole, ni à usage forestier, ni sur des espaces « naturels ») occupaient de 5 % à 9 % de la superficie nationale. Parmi ces sols, 70 % sont bâtis



ou revêtus (logement, routes...), ce qui affecte de manière souvent irréversible leurs fonctions de production agricole et de régulation du cycle de l'eau – par leur imperméabilisation.

La pollution des sols peut être d'origine industrielle (friches industrielles...) ou agricole et conduit à des excès de métaux lourds, de nutriments (azote, phosphore) et de pesticides dans les sols, qui passent souvent dans les eaux, avec des conséquences sur l'environnement (eaux non potables, eutrophisation, marée verte) et la santé humaine. Le chlordécone, par exemple, une molécule appliquée en Guadeloupe et Martinique entre 1972 et 1993 dans les bananeraies pour lutter contre la larve du charançon et non dégradée dans le sol par la flore microbienne, a contaminé les sols de manière durable : il faudra entre 100 et 700 ans avant que sa concentration descende à un seuil de contamination négligeable. La molécule se retrouve dans les légumes-racines, rendant impossible leur consommation.

Plus généralement, les sols agricoles ont subi depuis plusieurs décennies différents types de dégradation : perte irréversible par artificialisation, érosion, pollution chimique, mais aussi baisse de leur teneur en matière organique dans les régions sans élevage et avec la pratique du labour, tassement par les engins mécanisés ou le surpâturage, salinisation quand l'irrigation est mal maîtrisée. L'agroécologie et l'agriculture biologique proposent un nouveau paradigme avec des pratiques plus respectueuses des sols, qui concilient agriculture et écologie (voir l'article « Écosystèmes et agrosystèmes » p. 38).

Carte de la dégradation mondiale des sols d'origine anthropique, 2017.

Le Bassin méditerranéen fait à ce titre figure d'exemple. La dégradation des sols y est un problème ancien, et d'autant plus sérieux que la pression démographique qui ne cesse d'augmenter s'exerce sur un milieu naturel déjà très fragile. Les régions méditerranéennes cumulent en effet les facteurs propices à la dégradation des sols : un couvert végétal souvent clairsemé, l'agressivité des pluies et des vents, une topographie ondulée qui facilite l'érosion des sols en pente, des sols souvent peu épais, une aridité qui favorise l'accumulation des sels solubles dans ces sols. À cela s'ajoute une occupation humaine des plus anciennes avec une pratique continue de l'agriculture et de l'élevage depuis le Néolithique. Les problèmes d'érosion et de salinisation sont ainsi apparus très tôt dans cette région. L'érosion hydrique a accompagné la déforestation entamée dès l'introduction de l'agriculture ; elle s'est fortement accélérée aux époques grecque et romaine, puis s'est poursuivie à des ampleurs variables aux époques ultérieures. La forêt originelle qui couvrait 40 % de l'espace ne couvrait plus que 4 % à l'aube de l'an 2000. La salinisation, quant à elle, est apparue avec l'irrigation agricole. L'érosion et la salinisation auraient contribué au déclin de grandes civilisations en Mésopotamie, Égypte, Afrique du Nord, Grèce et Italie, parfois de manière irréversible.

RÉVERSIBILITÉ DES DÉGRADATIONS ET RÉSILIENCE DES SOLS

La dégradation des sols agricoles peut être réversible ou irréversible en fonction de son ampleur. Leur résilience est évaluée en répondant notamment aux questions suivantes : Quelles propriétés du sol sont dégradées par rapport à un état initial ? Quel est leur niveau de dégradation ? Un seuil d'irréversibilité a-t-il été franchi ? Quelle est la vitesse de retour à l'état initial, et suivant quelle trajectoire ?

La trajectoire de retour à l'état initial (processus de restauration) ne se superpose généralement pas à celle de dégradation. En effet, il est souvent difficile de revenir à l'état initial de l'écosystème une fois la transition produite, même si la pression diminue et que les conditions environnementales reviennent à leur niveau précédent. Un système biologique peut exister dans deux états différents et stables, l'un considéré comme sain et l'autre comme dégradé. Ce cadre théorique se heurte néanmoins au fait que les valeurs de seuil critique sont fonction des sols, des écorégions et ne sont pas connues pour la plupart des sols, en particulier ceux des régions tropicales. Il est donc nécessaire en premier lieu de chercher à éviter les dégradations ou de les réduire.

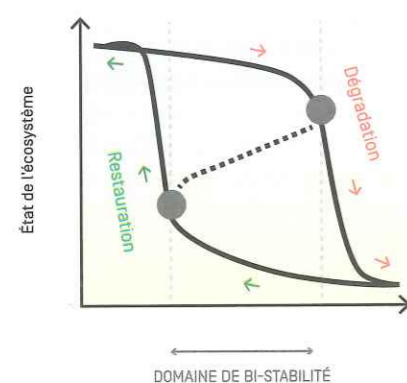
Le labour est à cet effet un exemple intéressant. En effet, si celui-ci est pratiqué pour limiter la compétition avec les plantes non cultivées (« mauvaises » herbes), décompacter le sol de surface ou encore enfouir les matières fertilisantes, il peut contribuer aussi à accélérer l'érosion, réduire la teneur en matière organique du sol, modifier la diversité biologique

Les divers types de transitions entre plusieurs états d'un même écosystème. A. Dans le cas d'une transition catastrophique, le seuil de résilience du système est franchi, entraînant l'irréversibilité de la dégradation ; B. La théorie de la succession conçoit l'existence de seuil réversible (transition abrupte) ou l'absence de seuil (transition progressive).

D'après Amandine Erktan, *Interactions entre composition fonctionnelle de communautés végétales et formation des sols sans des lits de ravines en cours de restauration écologique*, sciences de la Terre, université de Grenoble, 2013. [En ligne] www.theses.fr/2013GRENS024

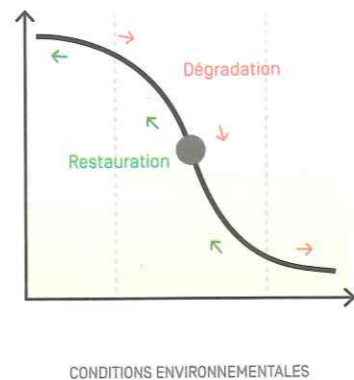
A. THÉORIE DES ÉTATS ALTERNATIFS

Transition catastrophique
[Seuils irréversibles ●]

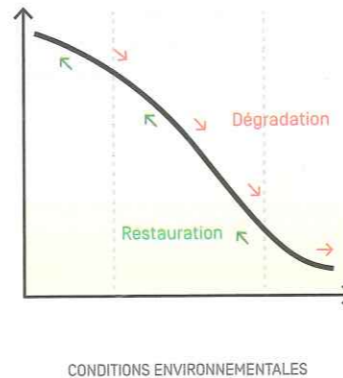


B. THÉORIE DE LA SUCCESSION

Transition abrupte
[Seuil réversible ●]



Transition progressive
[Absence de seuil]



du sol et, sur le long terme, contribuer à la dégradation des sols agricoles.

De manière plus générale, les effets du travail du sol sur la résilience des sols sont complexes. En effet, il affecte directement plusieurs propriétés du sol (teneur en matière organique, perméabilité, stabilité structurale...). Celles-ci sont également modifiées par le mode d'utilisation des terres ou encore le système de cultures. En outre, les effets du travail du sol sur sa résilience dépendent également du climat et d'autres caractéristiques environnementales.

Néanmoins, si le travail du sol est avéré depuis plusieurs millénaires, ses impacts sur la dégradation et la résilience des sols peuvent être aujourd'hui très importants. Et ces préoccupations sont vouées à s'accroître.

LES DÉFIS À VENIR

Depuis le début de l'humanité, le sol nourrit les hommes. Si jusqu'en 1800, la Terre ne comptait pas plus d'un milliard d'humains, elle en compte désormais sept milliards et en comptera neuf milliards vers 2050. Avec la pression démographique et les effets du changement climatique sur l'agriculture, la capacité des sols à continuer de nourrir l'humanité est mise au défi. Elle requiert plus que jamais une gestion durable.

La fonte du permafrost dans la région arctique, liée à l'augmentation de température à la surface du globe (+ 0,9 °C par rapport à la période 1850-1900), accélère le changement climatique. Les stocks de carbone dans le permafrost sont deux fois plus élevés que dans l'atmosphère. Sa fonte expose cette matière organique à la décomposition par les micro-organismes, engendrant des émissions de gaz à effet de serre (GES) : CO₂, CH₄, N₂O. Le constat actuel est que la fonte du permafrost se produit plus rapidement que ne le prédisent les modèles développés par les chercheurs. Outre la source d'émissions de GES qu'ils peuvent représenter, les stocks

de carbone dans les sols, hors permafrost, sont trois fois plus élevés que dans l'atmosphère et peuvent constituer un puits de carbone qui varie suivant les pratiques agricoles et forestières.

Un grand défi concerne donc les pratiques agricoles qui favorisent la séquestration de carbone dans les sols. Une faible augmentation des stocks de carbone dans le sol peut, si elle est généralisée et soutenue sur plusieurs décennies, atténuer les émissions d'origines anthropiques de GES. Comme près de la moitié des terres agricoles sont dégradées (notamment en lien avec une perte de carbone organique), cela rend possible une telle augmentation qui limiterait dans le même temps la perte annuelle de production agricole induite par cette dégradation. C'est l'objet de l'initiative « 4 pour 1 000 » (voir Savoir +). Réussir cette augmentation de façon pérenne suppose de parvenir conjointement à répondre à l'impératif d'intensification agricole pour la sécurité alimentaire et à contrecarrer les impacts négatifs que peuvent avoir les changements climatiques sur la productivité végétale et sur l'activité biologique et l'érosion des sols.

De nombreuses pratiques agricoles et forestières sont disponibles selon les contextes agroécologiques et les systèmes, et permettent d'accroître les stocks de carbone organique du sol, telles que l'agroécologie, l'agriculture de conservation, l'agroforesterie (voir encadré p. 40) ou la restauration des pâturages dégradés. Chaque pratique a toutefois ses propres limites en termes de faisabilité technique sur le terrain, de coût de mise en œuvre, et de potentiel de stockage de carbone dans les sols. Le recours à la science et la recherche s'impose donc, car de nombreuses questions demeurent.

SOL, PROTECTION JURIDIQUE ET GOUVERNANCE INTERNATIONALE

Les sols sont des milieux fragiles à protéger. Au niveau international, ils sont de plus en plus l'objet d'attention, notamment en raison des cobénéfices multiples de la matière organique des sols sur la biodiversité, la lutte contre la désertification et le changement climatique. Les sols et le carbone qu'il stocke sont ainsi présents au sein de trois conventions des Nations unies et des négociations en cours sur la mise en œuvre de l'accord de Paris (2015).

Au niveau européen, si la protection de l'eau et de l'air sont toutes deux encadrées par des directives européennes, ce n'est pas le cas pour les sols. Un projet de directive-cadre déposé en 2006 envisageait de « préserver, protéger et restaurer les sols » (Commission des communautés européennes, voir Savoir +), mais son adoption n'a pas abouti du fait de l'opposition de plusieurs États membres.

En droit français, il n'existe aucun texte expressément consacré à la protection des sols. Il faut regarder du côté des réglementations nationales et européennes relatives, par exemple, aux matières fertilisantes et aux produits



Dust Bowl, tempête de poussière en Oklahoma, États-Unis, 1935.

phytosanitaires. La Politique agricole commune (PAC) propose par ailleurs différents outils pour préserver la qualité des sols, comme l'obligation de rotation des cultures ou des mesures agro-environnementales prévoyant des incitations en faveur de la protection des sols. Il serait nécessaire que ceux-ci soient pris en compte dans les documents d'aménagement du territoire (Schéma de cohérence territoriale, Plan local d'urbanisme...) pour éviter que les extensions urbaines soient réalisées sur les sols les plus riches.

Les sols sont une ressource indispensable aux hommes et sont plus que jamais menacés. Il pourrait donc être sage de se souvenir des mots de Franklin D. Roosevelt qui déclarait dans une lettre transmise aux gouverneurs des États, suite au Dust Bowl, qu'« une nation qui détruit ses sols se détruit elle-même » (cité dans Coquet et Ruellan, voir Savoir +). ■■

SAVOIR +

Balesdent Jérôme et al., *Les sols ont-ils de la mémoire ?*, Quae, Versailles, 2015.

Commission des communautés européennes, Proposition de directive du parlement européen et du conseil définissant un cadre pour la protection des sols, COM(2006) 232 final, 2006. [En ligne] <https://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=COM:2006:0232:FIN:FR:PDF>

Coquet Yves, Ruellan Alain, *Les sols du monde pourront-ils nourrir 9 milliards d'êtres humains ?*, Le Pommier, Paris, 2010.

Feller Christian et al., *Le Sol : une merveille sous nos pieds*, Belin, Paris, 2016.

Ruellan Alain, *Des sols et des hommes : un lien menacé*, IRD, Bondy, 2010.

Site de l'initiative « 4 pour 1 000 » : www.4p1000.org

COMMUNICATION ET RÉSEAUX SOCIAUX CHEZ LES PLANTES

Par Francis Martin, microbiologiste dans l'unité Interactions arbres-microorganismes de l'INRA de Nancy, directeur du laboratoire d'excellence Arbre

La science montre que les plantes sont sensibles à leur milieu et communiquent. Comment ces constats peuvent influencer notre vision des végétaux et notre gestion des écosystèmes ?

■ DEPUIS UNE TRENTAINE D'ANNÉES, de nombreux laboratoires étudient les relations des plantes entre elles, mais aussi avec les autres organismes, insectes ou microbes. Ces interactions complexes impliquent des systèmes de communication sophistiqués, via l'émission de molécules volatiles ou par voie souterraine (réseaux mycorhiziens). Extrapolant à partir des publications scientifiques, certains auteurs considèrent les plantes comme des « êtres émotionnellement sensibles » et parlent de « communication intentionnelle », et même d'« intelligence » des végétaux.

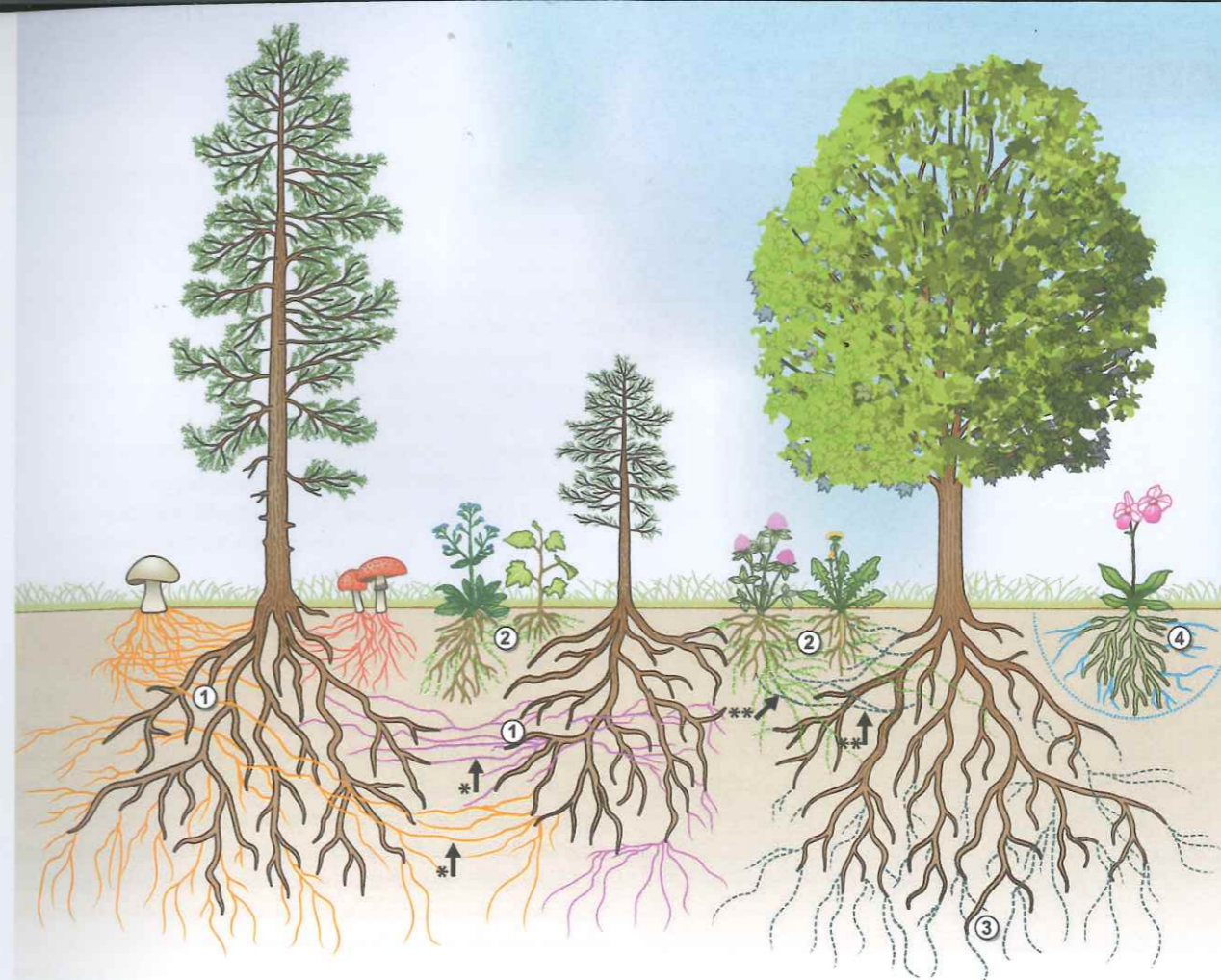
SENSIBILITÉ À L'ENVIRONNEMENT ET ÉMISSION DE SIGNAUX CHIMIQUES

Depuis Aristote, les plantes sont considérées comme des organismes vivants, mais passifs, juste capables de croître, de respirer et de se nourrir. Le philosophe grec leur a attribué une « âme végétative », bien inférieure à l'« âme sensitive » des animaux et bien loin de l'« âme intellectuelle » de l'homme. Cette vision anthropocentrique du monde a été relayée au cours des siècles par les philosophes et les théologiens occidentaux. Il faut attendre les travaux de Charles Darwin au XIX^e siècle et de son fils Francis pour que cette vision du monde végétal évolue sensiblement. Les savants anglais ont alors démontré que les plantes possédaient des capacités sensorielles leur permettant de percevoir le monde qui les entoure et d'interagir avec leur environnement. Elles réagissent rapidement aux perturbations extérieures afin de s'y adapter et de compenser ainsi leur immobilité forcée.

Des recherches ultérieures ont confirmé que les plantes perçoivent leur environnement et s'y adaptent par leurs mouvements. Comme les animaux, elles possèdent plusieurs sens dont la vision, l'odorat et le toucher. Les signaux sont perçus par une multitude de capteurs, de récepteurs, qui ont la particularité d'être répartis sur toute la surface de la plante, et non pas localisés dans des organes spécialisés comme chez les animaux.

Les biologistes considèrent que la communication implique l'émission d'un signal suivie de sa réception induisant un changement d'attitude adaptée. Sur la base de cette définition, on peut sans aucun doute parler de communication végétale. La nature des messages échangés ainsi que les voies de communication sont diverses. Les plantes sont capables d'émettre des signaux de stress ou de satiété, et de tisser des liens avec les microbes du sol. Elles sont donc douées de sensibilité, c'est-à-dire capables de ressentir les modifications du milieu et d'y réagir. Comment peuvent-elles percevoir les multiples signaux extérieurs qui les assaillent ? Comment ces signaux sont-ils captés et interprétés par les voies de signalisation moléculaire ? Comment cellules, tissus, organes et plantes répondent-ils à ces signaux environnementaux ? Comment s'y adaptent-ils ?

Les plantes forment des communautés végétales constituées de dizaines d'espèces différentes, le plus souvent en compétition pour les ressources qui assurent leur croissance. Il est donc indispensable qu'elles soient capables, d'une part, de percevoir leurs voisines – leurs congénères mais aussi leurs compétitrices – et, d'autre part, de se percevoir elles-mêmes dans l'espace et d'adapter leurs mouvements



Réseaux mycorhiziens en forêt. 1. Les arbres sont reliés entre eux par des champignons formant des ectomycorhizes (voir les flèches *). Les plantes herbacées (2) sont également reliées entre elles, ainsi qu'aux réseaux mycorhiziens des arbres (3 ; voir les flèches **). 4. Des espèces d'orchidées forestières peuvent aussi former des réseaux de ce type. Les filaments des champignons sont représentés par des couleurs différentes selon les espèces. D'autres connections de réseaux que celles montrées ici sont encore possibles.

Source : Van der Heijden et al., « Mycorrhizal ecology and evolution: the past, the present, and the future », *New Phytologist*, n° 205, 2015, p. 1412.

en conséquence. Elles doivent donc communiquer. Ces processus de perception et de communication sont contrôlés par une série de photorécepteurs et de signaux diffusibles.

Les plantes ne possèdent pas de système nerveux, mais le réseau de vaisseaux conducteurs qui irriguent tous les organes de la plante constitue un système circulatoire très efficace : il transporte les éléments minéraux et les nutriments via la sève brute ou la sève élaborée, mais aussi des signaux multiples capables d'informer les différentes parties de la plante sur les sources de nourriture et sur les stimuli en provenance de leur environnement. Parmi ces signaux diffusibles, les hormones jouent un rôle majeur dans l'intégration des messages internes et externes et dans la coordination des réponses adaptatives. Certaines familles (comme les auxines) sont connues depuis longtemps, contrairement aux mécanismes d'action d'autres hormones, tels l'éthylène et le jasmonate de méthyle, qui ne sont pas encore complètement

élucidés. D'autant que ces dernières molécules, volatiles, jouent un rôle dans la communication entre les plantes, mais également avec les insectes et avec les microbes. Peu à peu, la science dévoile l'incroyable complexité des réseaux hormonaux qui permettent aux plantes d'avoir des réponses intégrées, coordonnées et rapides face à un ensemble de signaux environnementaux. Ainsi, les plantes ajustent en permanence leur croissance et leur posture en réaction à un ensemble de stimuli environnementaux : lumière, gravité, vent, sécheresse, niveau de nourriture.

Une autre aptitude étonnante est la capacité des plantes à réagir rapidement lors d'une agression. Enracinées dans le sol, elles ne peuvent pas s'enfuir lorsqu'elles sont confrontées à un prédateur. Au cours de plus de 450 millions d'années d'évolution, les plantes terrestres ont donc développé plusieurs mécanismes afin de se défendre contre les ravageurs, attirés par la richesse nutritive de leurs feuilles. Une plante attaquée libère ainsi un cocktail d'odeurs, des composés organiques volatils (COV), issus de trois grandes classes de molécules : les terpènes, les benzénoides et les alcools/aldéhydes. Chaque individu est caractérisé par un « bouquet » de senteurs spécifiques dont la composition peut varier dans le temps ou lorsque la plante est attaquée. Les COV servent de messagers olfactifs et alertent les autres parties de la plante ou les plantes voisines, provoquant une réaction de sensibilisation. Dès qu'un insecte grignote une

LES ECTOMYCORHIZES DES ARBRES FORESTIERS

Les racines des grandes essences sylvoles des forêts tempérées et boréales (par exemple pins, chênes, etc.) portent généralement des symbioses ectomycorhiziennes qui sont formées par des champignons (par exemple amanites, bolets, truffes). Morphologiquement, on distingue une racine courte ectomycorhizée par la présence du manteau fongique externe recouvrant la racine.

Les filaments mycéliens de ce manteau se développent d'une part vers l'intérieur de la racine, en s'insinuant entre les cellules du cortex racinaire et d'autre part vers l'extérieur, en un réseau qui explore le sol. Ce réseau mycélien prospecte le sol et mobilise des éléments minéraux inaccessibles aux racines de la plante hôte ; il favorise ainsi la nutrition et la croissance des arbres. Ces filaments mycéliens externes

peuvent également entrer en association avec les racines des plantes voisines. De ce fait, la symbiose mycorhizienne permet l'établissement d'un véritable réseau social de plantes et de champignons d'espèces différentes, reliés entre eux. Des plantes voisines, même d'espèces différentes, peuvent donc partager des champignons communs.

plante, la blessure provoque la mise en route d'un système de défense très sophistiqué. La destruction des cellules de la zone attaquée libère une hormone diffusible d'alerte, le jasmonate de méthyle. Celui-ci est alors perçu par les cellules adjacentes encore épargnées, induisant une cascade d'événements moléculaires jusqu'à la synthèse massive d'inhibiteurs des enzymes de digestion de l'insecte. Avalées par le prédateur, ces molécules provoquent une indigestion qui le décourage de poursuivre son repas. Le jasmonate de méthyle peut également attirer les prédateurs des insectes qui attaquent la plante. Ainsi, lorsque la chenille *Spodoptera exigua* se nourrit d'une tendre feuille de maïs, elle ingère une grande quantité d'acide linoléique, un des acides gras majeurs des cellules végétales. Dans son intestin, cet acide linoléique se conjugue à la glutamine, un acide aminé, pour former la volicitine. Celle-ci est ensuite incorporée dans la salive de l'insecte, puis relâchée quand il poursuit son repas. Ce composé déclenche alors chez la plante la synthèse de jasmonate de méthyle, qui, diffusant dans l'air ambiant, attire une petite guêpe parasite qui pond ses œufs dans la chenille, la condamnant ainsi à une mort certaine.

NUTRITION ET COMMUNICATION VIA LES RÉSEAUX MYCORHIZIENS

Lors d'une expérience menée dans les années 1990, le professeur Suzanne Simard s'est intéressée à de jeunes bouleaux et sapins de Douglas, dont 90 % des racines étaient en symbiose avec le même champignon ectomycorhizien (un rhizopogon). Le mycélium du champignon mutualiste recouvre les racines courtes et pénètre entre les cellules de la racine, formant une interaction durable. Contrairement aux champignons endomycorhiziens à arbuscules, il ne colonise pas l'intérieur des cellules de son hôte. Ces jeunes arbres ont été marqués par l'apport de CO₂ enrichi en isotopes différents du carbone (¹³C et ¹⁴C). Les marquages ont révélé que bouleaux et sapins,

connectés par leurs réseaux mycorhiziens souterrains, recevaient chacun du carbone l'un de l'autre, avec un flux net en faveur du sapin, la quantité de carbone reçu par ce dernier équivalant à 10 à 25 % de sa photosynthèse. Ces travaux originaux démontrent pour la première fois que le réseau de filaments fongiques ectomycorhiziens est impliqué dans le transfert de composés carbonés, probablement sucres et acides aminés, entre jeunes arbres.

Ces dernières années, des expérimentations, réalisées par l'équipe de Marc-André Selosse du Muséum national d'histoire naturelle de Paris, ont démontré que plusieurs espèces d'orchidées sont partiellement nourries par un réseau mycorhizien qui les relie aux arbres voisins. Elles



Une orchidée mycohétérotrophe : la néottie nid-d'oiseau (*Neottia nidus-avis*), Saint-Jean-d'Arves en Savoie.

s'adaptent ainsi à l'ombre des forêts et complètent leur alimentation photosynthétique en récupérant des composés carbonés des arbres voisins, grâce au réseau mycorhizien souterrain, car elles partagent les mêmes champignons. Cette nutrition mixte, où les sucres sont à la fois issus de la photosynthèse et du réseau mycorhizien, est appelée « mixotrophie ». De plus, des orchidées forestières totalement non chlorophylliennes, comme la néottie nid-d'oiseau (*Neottia nidus-avis*), sont entièrement nourries par les champignons qui forment des réseaux mycorhiziens : on les dit « mycohétérotrophes ». Le réseau mycorhizien permet à ces plantes de vivre dans les sous-bois des forêts impénétrables où la lumière est rare.

Les plantes reliées par un réseau mycorhizien peuvent même partager des signaux d'alerte. Une plante attaquée par un champignon pathogène ou un insecte herbivore semble être capable d'induire chez ses voisines des défenses similaires. On ignore toutefois la nature des signaux, et la façon dont ils transitent dans les réseaux mycorhiziens connectant les plantes. S'agit-il d'une ou plusieurs molécules qui circulent ou diffusent dans ou à la surface des hyphes (filaments constitutifs du mycélium) ? Des dépolarisations électriques le long des hyphes ont même été proposées, mais on ne sait encore rien du mécanisme. Certains scientifiques avancent que les réseaux mycorhiziens pourraient bien assurer la coordination des défenses dans les communautés végétales. Il est toutefois nécessaire de rester prudent, car les démonstrations expérimentales sont peu nombreuses et les expériences conduites dans des systèmes très simplifiés, bien loin de la complexité des interactions écologiques prenant place en forêt.

UNE INTELLIGENCE VÉGÉTALE ?

À l'issue de ce panorama rapide de la biologie de la communication végétale, il est clair que les plantes perçoivent leur environnement et y réagissent, et qu'elles échangent des informations et de la matière entre leurs différents organes, mais également avec les autres organismes abrités par les communautés végétales. La recherche dans ce domaine progresse rapidement et modifie notre perception du monde végétal. Sans cerveau centralisateur et sans système nerveux, les plantes réussissent avec leurs cellules et leurs capacités à recevoir et émettre des signaux chimiques, électriques, mécaniques, lumineux, à modifier leur croissance, leur orientation, leur appétence pour les prédateurs... Si l'intelligence est un ensemble de processus qui permet d'apprendre ou de s'adapter à des situations nouvelles, alors les plantes sont intelligentes. L'existence d'une conscience réflexive centralisée n'a cependant jamais été mise en évidence. Cette intelligence végétale est donc bien éloignée de l'intelligence cognitive des humains et les scientifiques se doivent d'éviter tout sentimentalisme ou anthropomorphisme dans leurs descriptions du monde végétal. ■■



Cluster de racines d'épicéa ectomycorhizées, découvert dans la litière, et qui montre bien comment les racines de la plante hôte sont transformées par la présence du champignon symbiotique.

Les racines forment une structure très ramifiée sous l'influence des auxines libérées par le champignon. Elles sont recouvertes du duvet blanchâtre correspondant au manteau du mycélium fongique.

SAVOIR +

Barto E. Kathryn, Weidenhamer Jeffrey D. et al., « Fungal superhighways : do common mycorrhizal networks enhance below ground communication ? », *Trends in Plant Science*, n° 17, 2012, p. 633-637.

Klein Tamir, Siegwolf Rolf Theodor Walter, Körner Christian, « Belowground carbon trade among tall trees in a temperate forest », *Science*, n° 352, 2016, p. 342-344.

Martin Francis, *Sous la forêt : pour survivre, il faut des alliés*, Humensis/Humensciences, Paris, 2019.

Selosse Marc-André, Richard Franck et al., « Mycorrhizal networks : les liaisons dangereuses », *Trends in Ecology and Evolution*, n° 11, 2006, p. 621-628.

Selosse Marc-André, *Jamais seul : ces microbes qui construisent les plantes, les animaux et les civilisations*, Actes Sud, Arles, 2017.

Simard Suzanne W. et al., « Net transfer of carbon between ectomycorrhizal tree species in the field », *Nature*, n° 388, 1997, p. 579-582.

LE PHYTOBIOME ET L'AGRICULTURE DE DEMAIN

Par Philippe Roumagnac et Hervé Sanguin, virologue, et microbiologiste du sol au Centre de coopération internationale en recherche agronomique pour le développement (Cirad), Montpellier

Une connaissance approfondie des interactions microbiennes se déroulant dans l'intimité de la plante se traduira demain par l'avènement d'une agriculture focalisée sur la santé végétale.

■ LE PHYTOBIOME inclut la plante (« phyto ») dans une unité biogéographique distincte (« biome »). Cette vision holistique de la plante se formalise au travers des réseaux d'interactions s'établissant entre la plante, les micro- et les macro-organismes vivant en son sein ou à sa surface, et les facteurs environnementaux (le sol, l'air, etc.) qui influencent ces interactions.

En 2016, la recherche scientifique sur le phytobiome a pris une nouvelle dimension suite à la constitution d'un groupe de réflexion, Phytobiomes Alliance (voir Savoir +), constitué par un collègue d'experts du monde universitaire américain et plusieurs acteurs du secteur agricole et des biotechnologies. Une synergie s'est établie avec les recherches menées au niveau européen, aboutissant entre autres à la mise en place du consortium MicrobiomeSupport (voir Savoir +). L'année 2018 a été marquée par la tenue du premier congrès international sur le phytobiome, réunissant une très large communauté internationale de scientifiques des secteurs public et privé afin de faire progresser collectivement la recherche sur le phytobiome et de poser les premières pierres d'une nouvelle révolution agricole. Un plan d'action ambitieux a été dressé, alliant recherche fondamentale pour décrypter comment les organismes associés aux plantes influencent ou sont influencés par la plante ou son environnement, et recherche appliquée qui utilise ces informations pour améliorer la productivité et la durabilité d'une agriculture plus respectueuse de l'environnement.

Pourquoi maintenant? La conceptualisation du phytobiome a été rendue possible suite à l'avènement des nouvelles technologies de séquençage haut débit et au développement d'outils bio-informatiques permettant d'accéder à une image exhaustive de l'une des composantes les plus complexes du phytobiome, le **microbiote** de la plante. L'étude

de l'écologie et de la santé des plantes est étroitement liée à notre connaissance du microbiote hébergé par ces mêmes plantes, à l'instar du microbiote intestinal en santé humaine. Les plantes vivent en association avec une communauté diverse et complexe de virus et de micro-organismes (par exemple bactéries, oomycètes, champignons, protistes, etc.) interagissant entre eux et avec leur plante hôte. Cette diversité des interactions a une forte incidence sur l'aptitude d'une plante à adapter sa croissance et son développement. Il a ainsi été montré que ces interactions ont une influence sur l'acquisition de nutriments et d'eau par la plante, sur son développement ou sa capacité de résistance à de nombreux stress biotiques (agents pathogènes, insectes, ravageurs, etc.) et abiotiques (pesticides, herbicides, fertilisants, déficit hydrique, etc.). L'optimisation de ces assemblages microbiens est donc un enjeu majeur en vue d'une intensification écologiquement durable des systèmes de culture.

Deux stratégies de gestion du microbiote à des fins agricoles sont envisagées actuellement. La plus répandue est l'utilisation de souches microbiennes ou virales comme biopesticides ou biostimulants, avec un marché qui devrait représenter plusieurs milliards d'euros en 2025. La seconde, plus ambitieuse mais plus en accord avec la complexité du microbiote de la plante, est la formulation et la gestion de communautés microbiennes synthétiques ou natives optimales pour la plante. Reposant sur les connaissances acquises sur le terrain, cette stratégie a pour objectif de gérer le microbiote directement à la source (*in situ*) en préservant la biodiversité microbienne des agrosystèmes ou en intervenant sur les paramètres environnementaux biotiques et abiotiques pour optimiser la composition de ces communautés microbiennes. Cette seconde stratégie représente la solution la plus durable, mais reste limitée par des verrous

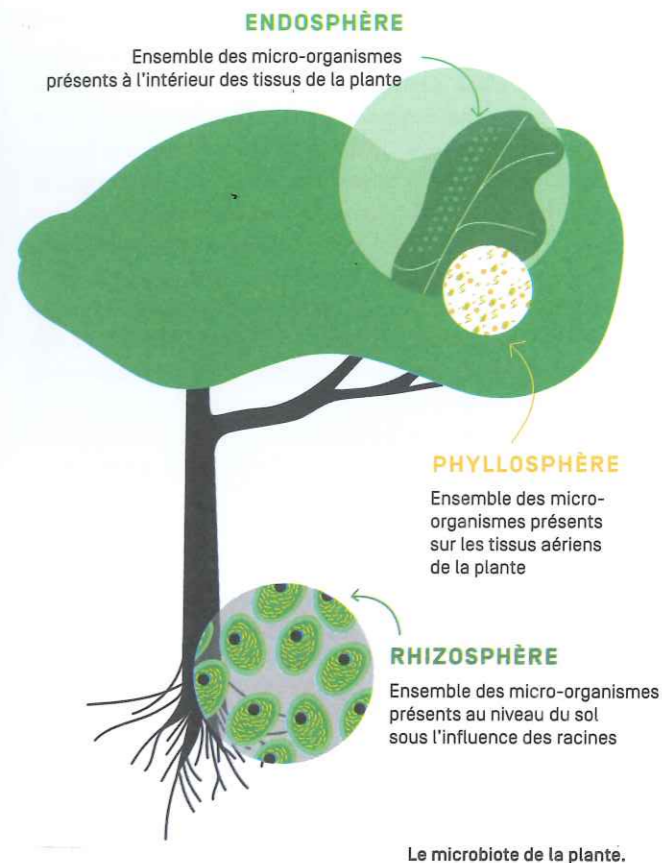
techniques, commerciaux et juridiques encore considérables. Ces différentes stratégies ne sont pas à opposer, et peuvent être complémentaires suivant l'état sanitaire du système de culture. Les efforts entrepris pour décrypter le fonctionnement du phytobiome permettent actuellement d'envisager une forte progression de ces stratégies par l'identification de réseaux d'acteurs clés. Un consortium international de chercheurs américains et coréens a ainsi démontré que le transfert de la partie du sol sous l'influence des racines (la rhizosphère) provenant d'une variété de tomate résistante à un pathogène vers une variété sensible pouvait conférer les propriétés de résistance à cette dernière. Le consortium a ensuite pu identifier un des acteurs microbiens conférant la résistance par la mise en place d'une approche de simplification progressive du microbiote.

Parmi les acteurs clés du phytobiome, les champignons mycorhiziens et les virus ont été longtemps sous-estimés ou mal compris, alors qu'ils sont cruciaux pour l'intensification écologique de l'agriculture de demain. À travers des exemples fondateurs, voici l'histoire passée et future de ces étoiles montantes du phytobiome.

LES CHAMPIGNONS, CHEF D'ORCHESTRE DES ÉCHANGES SOL-PLANTES

Le sol héberge une diversité de micro-organismes incroyable, jouant un rôle clé dans les cycles biogéochimiques, la séquestration du carbone et la productivité végétale. Parmi cette richesse microbienne, certains champignons ont fait le choix, il y a plus de 400 millions d'années, de pénétrer dans l'intimité de la plante en établissant une symbiose dite endomycorhizienne, tout en gardant un pied dans le sol. Les premières descriptions de cette association datent de la fin du XIX^e siècle par le mycologue français Pierre-Augustin Dangeard. Le champignon est alors appelé injustement *Rhizophagus populinus* (« mangeur-de-racine de peuplier ») en raison de sa présence dans des racines de peupliers malades.

Les **champignons endomycorhiziens** constituent le groupe des Gloméromycètes. Ils colonisent plus de 80 % des plantes et sont des acteurs majeurs de la nutrition des plantes. La symbiose mycorhizienne repose sur un échange à bénéfice réciproque dans lequel le champignon permet à la plante d'acquérir des éléments minéraux (phosphore, azote, potassium...) nécessaires à sa croissance; en retour, elle fournit au champignon des ressources carbonées. On estime ainsi qu'environ 10 % des produits issus de la photosynthèse de la plante sont captés par le champignon endomycorhizien. L'importance écologique de ces champignons a longtemps été sous-évaluée, alors que de nombreux travaux scientifiques ont démontré leur rôle dans la structuration du sol via la sécrétion d'une protéine appelée « glomaline », la protection des plantes via la régulation des taux de différentes phytohormones et l'induction de résistance systémique, et enfin la recolonisation de terres dégradées par des



plantes pionnières. Étudier l'écologie et la physiologie des plantes au sein de leur écosystème sans prendre en compte ces champignons est donc très artificiel.

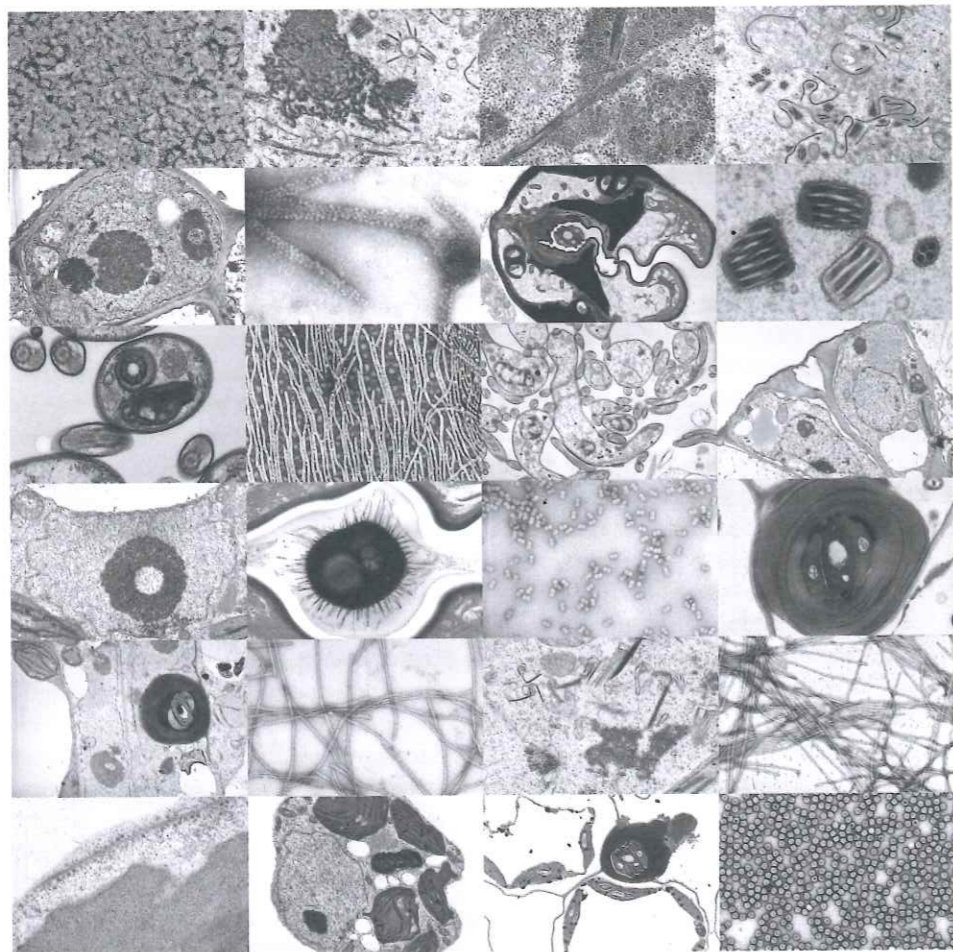
Pour comprendre la place centrale qu'occupent les champignons mycorhiziens au sein du phytobiome, il faut visualiser ce qui se joue sous nos pieds. Il existe en effet un maillage extrêmement dense, connectant les plantes entre elles, constitué par le **mycélium** des champignons mycorhiziens. Ce réseau, qui peut représenter plusieurs kilomètres pour un seul individu fongique, est le lieu d'échanges nutritifs importants entre les plantes mais aussi avec d'autres individus, ainsi qu'avec le reste des micro-organismes et de la faune du sol. Il n'est pas seulement trophique, mais représente un lieu où transitent des signaux permettant d'alerter un ensemble de plantes de la présence d'agents pathogènes ou de ravageurs (voir l'article « Communication et réseaux sociaux chez les plantes » p. 30). Le réseau de communication dépasse alors la simple interaction entre un champignon et une plante et prend une ampleur multidimensionnelle, allant de l'interaction plante-plante à l'interaction entre micro-organismes, faune du sol et insectes.

Les mécanismes impliqués et la nature des signaux transmis restent cependant encore peu connus, mais il est démontré que les champignons endomycorhiziens modifient le fonctionnement du système immunitaire de la plante. La protection systémique qu'ils induisent présente

de nombreuses similitudes avec la résistance systémique acquise lors d'infection par des pathogènes ou celle induite après colonisation des racines par des rhizobactéries non pathogènes. Le champignon endomycorhizien joue un rôle de sentinelle mais aussi de mémoire, permettant à la plante de répondre plus vite et plus efficacement à des attaques de pathogènes. Cependant, tous les champignons endomycorhiziens n'ont pas les mêmes performances suivant la plante hôte ou le type d'attaque, et leur efficacité est dépendante de leur moment d'arrivée au sein ou auprès de la plante. Certains champignons endomycorhiziens sont mêmes assimilés à des tricheurs, alors que d'autres montrent une forte coopération entre eux, nous encourageant à mieux connaître les acteurs et leurs jeux respectifs pour mieux décrypter les bases du scénario de la croissance et du développement des plantes.

LES VIRUS DES PLANTES, PETITS MAIS ÉCOLOGIQUEMENT COSTAUDS

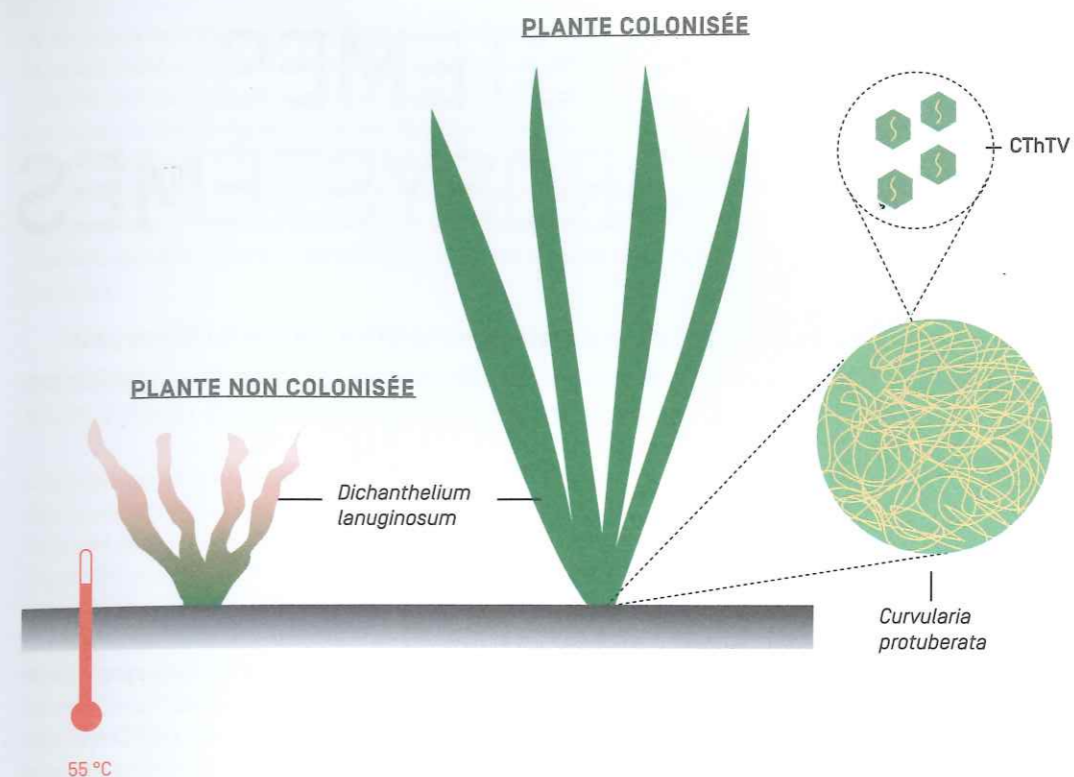
Depuis le début du XXI^e siècle, l'avènement du séquençage à haut débit sans *a priori* des acides nucléiques des virus des plantes (**phytovirus**) et des champignons (**mycovirus**)



Ensemble de photos de virus de plantes observé au microscope électronique.

a ouvert la porte à la compréhension des rôles écologiques joués par ces virus dans le fonctionnement des écosystèmes terrestres. Faisant partie intégrante du microbiote des plantes, ils peuvent avoir un impact à au moins trois niveaux au sein de l'écosystème : la régulation de la diversité des plantes et la limitation de l'envahissement de l'écosystème par une espèce végétale dominante; la réduction, pour certains, de la virulence de champignons pathogènes; enfin, un rôle bénéfique sur la croissance et le développement de la plante. Pour mieux comprendre ces rôles écologiques des phytovirus et des mycovirus, les scientifiques cherchent actuellement à mieux connaître leur diversité, leur distribution géographique et leurs mécanismes d'infection et de transmission. Ces travaux devraient déboucher sur une meilleure compréhension de l'épidémiologie des maladies virales des plantes, mais aussi sur l'élaboration d'outils de biocontrôle.

Concernant les aspects de description exhaustive du **virome** (l'ensemble des virus) des plantes à l'échelle de l'agro-écosystème, des travaux récents réalisés dans la région floristique du Cap en Afrique du Sud et en Camargue ont révélé deux résultats principaux. Ils ont montré tout d'abord que les infections virales sont significativement plus fréquentes en



Ménage à trois. Figure opposant à gauche une plante chétive non colonisée par le duo champignon-virus à une plante à droite en bonne santé, infectée par le duo champignon-virus dans les conditions environnementales extrêmes du parc national du Yellowstone.

D'après Marilyn J. Roossinck, « The good viruses: viral mutualistic symbioses », *Nature Reviews Microbiology*, n° 9, 2011, p. 99-108, fig. 3. [En ligne] www.nature.com/articles/nrmicro2491

zone cultivée qu'en zone naturelle, suggérant que le regroupement et la concentration d'organismes génétiquement proches (les variétés cultivées) favorisent les épidémies. Ces travaux ont indiqué par ailleurs que les compartiments naturels, encore largement inexplorés en termes de biodiversité des micro-organismes, recèlent une grande quantité de virus des plantes encore non connus et non caractérisés. Ces travaux suggèrent qu'une meilleure connaissance de ces zones naturelles bordant les parcelles agricoles pourrait permettre de mieux comprendre l'émergence des maladies des plantes en localisant les réservoirs de phytovirus et en étudiant leurs modes de transmission et d'adaptation.

Concernant le biocontrôle et l'utilisation spécifique de certains virus contre les champignons phytopathogènes, quelques travaux ont montré la pertinence de ce type de stratégie de lutte. À titre d'exemple, l'utilisation d'un mycovirus (*Cryphonectria hypovirus-1*) qui infecte le champignon *Cryphonectria parasitica* et induit une forte diminution de son pouvoir pathogène a permis de diminuer l'impact du chancre du châtaignier. Cette maladie invasive extrêmement néfaste, qui a ravagé au XX^e siècle les forêts de châtaigniers américaines et européennes, a notamment causé l'élimination du châtaignier des forêts naturelles de la côte est américaine.

Enfin, une très belle étude a montré qu'un virus (*Curvularia thermal tolerance virus*, CThTV) infectant un champignon (*Curvularia protuberata*), lui-même infectant une plante (*Dichanthelium lanuginosum*), permettait à cette dernière de se développer dans un environnement hostile comme peuvent l'être les sols à température élevée (55 °C) du parc du Yellowstone aux États-Unis. Ces travaux ont montré

qu'en l'absence du virus la plante reste chétive, suggérant un effet bénéfique indirect de l'infection du champignon par le virus sur la croissance de la plante dans ces conditions environnementales extrêmes. L'étude, qui a mis en évidence ce « ménage à trois » original dans le parc du Yellowstone, souligne la nécessité de mieux caractériser le microbiote en général, et le virome en particulier, pour mieux comprendre les interactions entre les plantes et leur microbiote afin d'élaborer de nouvelles approches agronomiques permettant d'éviter ou de réduire l'usage massif d'engrais et de pesticides.

Les travaux menés sur le virome des plantes ou sur les champignons endomycorhiziens sur lesquels nous avons donné un coup de projecteur soulignent que l'optimisation des interactions microbiennes pour une meilleure santé des plantes ne pourra aboutir que par la prise en compte de la diversité des interactions qui se déroulent dans l'intimité de la plante. ■■

SAVOIR +

Astier Suzanne, Albouy Josette et al., *Principes de virologie végétale : génome, pouvoir pathogène, écologie des virus*, INRA, Paris, 2001.

Garbaye Jean, *La Symbiose mycorhizienne : une association entre les plantes et les champignons*, Quae, Paris, 2013.

Selosse Marc-André, *Jamais seul : ces microbes qui construisent les plantes, les animaux et les civilisations*, Actes Sud, Arles, 2017.

Site de Phytobiomes Alliance : www.phytobiomesalliance.org

Site du consortium Microbiome Support : www.microbiomesupport.eu

ÉCOSYSTÈMES ET AGROSYSTÈMES

Par **Éric Malézieux**
et **Bruno Rapidel**,
chercheurs au Cirad,
Montpellier

Les agrosystèmes, écosystèmes modifiés par les humains pour assurer leur alimentation, bénéficient de l'étude des écosystèmes naturels pour restaurer les fonctions de régulation.

■ **LES ÉCOSYSTÈMES NATURELS** sont constitués par des communautés d'êtres vivants interagissant au sein de leur milieu de vie selon différents processus complexes de compétition (pour la lumière, pour l'eau, les nutriments, etc.), d'exploitation (prédation, parasitisme) et de coopération (mutualisme, dont symbiose). Ces différentes interactions structurent l'organisation et le fonctionnement de l'écosystème pour assurer sa reproduction et son adaptation aux éventuelles modifications de son environnement. Dans les écosystèmes naturels, les communautés en interaction génèrent des flux de matière, d'énergie et d'information entre elles et avec leur environnement, dans un équilibre dynamique. Les bilans d'extraction de matière de ces écosystèmes naturels sont en moyenne relativement faibles (flux d'érosion des sols, par exemple).

L'humanité tire un grand bénéfice des fonctions assurées par les écosystèmes. Ces bienfaits sont perçus depuis longtemps, mais ont été oubliés avec le développement de nos sociétés citadines. Récemment, un effort international a été mené pour en établir la liste et les évaluer, l'Évaluation des écosystèmes pour le millénaire. Ces bénéfices, appelés services écosystémiques, ont été classés en services d'approvisionnement (bois, champignons, pollinisation, fruits et graines, etc.), de régulation (dépollution de l'eau et de l'air, lutte contre l'érosion, les ravageurs et les maladies, recyclage de matière organique, fixation de carbone, etc.) et de culture (récréation, valeur patrimoniale, etc.).

L'équilibre dynamique des écosystèmes naturels est toutefois susceptible d'être bousculé, par exemple par des incendies ou des événements climatiques violents. Toutefois,

la diversité spécifique et fonctionnelle des écosystèmes et la complexité du réseau d'interactions qui les caractérisent favorisent leur capacité à résister à ces perturbations et à continuer à assurer leurs fonctions. Depuis Charles Darwin, l'hypothèse que la stabilité et la durabilité des écosystèmes reposent sur leur diversité biologique a fait l'objet de nombreuses études et débats chez les écologues. Cette stabilité semble en réalité dépendre d'un grand nombre de facteurs.

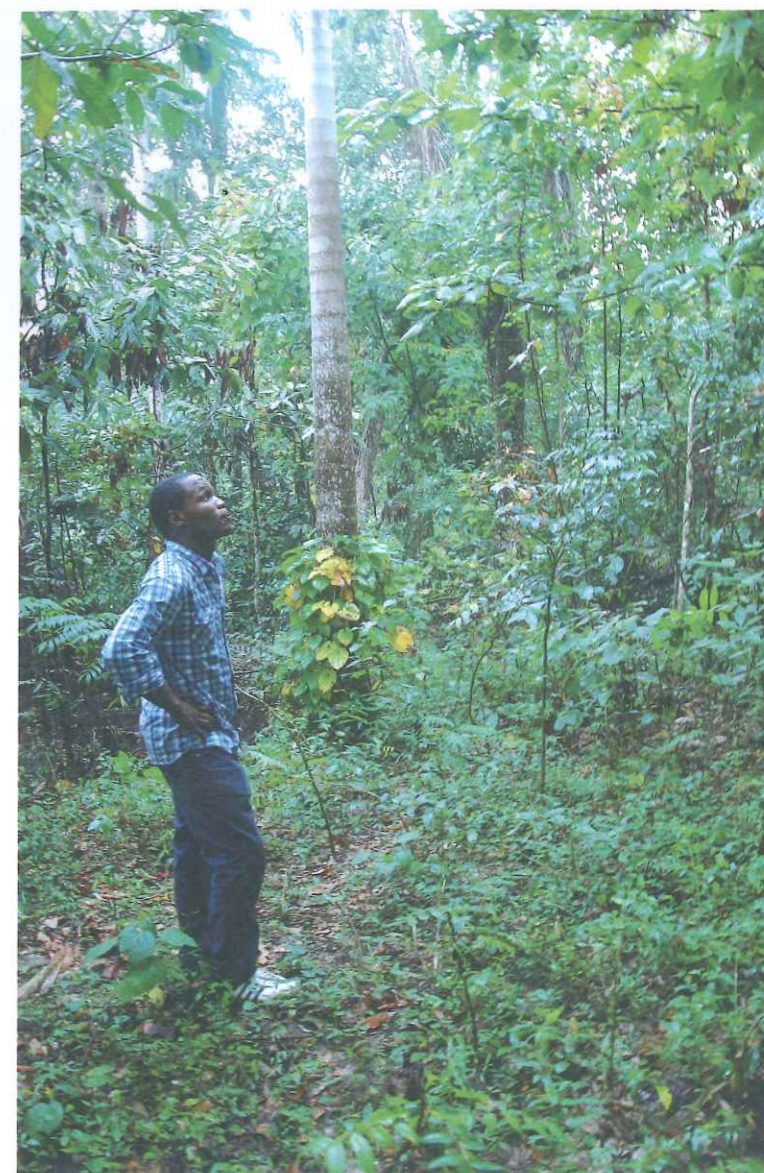
LES AGROSYSTÈMES, DES ÉCOSYSTÈMES SIMPLIFIÉS ET GÉRÉS PAR LES HUMAINS

L'espèce humaine a modifié le fonctionnement de la plupart des écosystèmes en exploitant des ressources, en modifiant les biotopes locaux ou globaux (changement climatique, introduction d'espèces invasives), mais surtout elle a construit et modelé depuis le Néolithique de nouveaux écosystèmes : les **agrosystèmes**. Ceux-ci peuvent être définis comme des écosystèmes gérés afin de produire la biomasse nécessaire à l'humanité pour ses différents besoins. Ces besoins sont en premier lieu alimentaires, mais peuvent aussi inclure la production de textiles, de produits à vertus médicinales et même, aujourd'hui, d'agrocultures.

Le développement des agrosystèmes a eu des impacts majeurs sur la diversité biologique. À l'inverse des écosystèmes naturels dont la plupart associent une strate herbacée et une strate arborée, l'immense majorité des systèmes cultivés intensifiés ne comprennent plus qu'une seule strate de végétation, et beaucoup sont monospécifiques. En outre, l'agriculture a entraîné le choix et la sélection génétique des espèces cultivées ou élevées. Ce processus de spécialisation est à l'œuvre depuis le début de l'agriculture, il y a plus de 10 000 ans, mais s'est largement accéléré depuis le début de la révolution verte, dans les années 1960.

En focalisant les écosystèmes sur une seule de leurs fonctions, la production de biomasse destinée à être exportée hors de la parcelle cultivée, les agrosystèmes ont rompu l'équilibre dynamique qui caractérise les écosystèmes naturels. Les fonctions de régulation, en particulier celles des cycles des éléments nutritifs et des bioagresseurs, ont été largement interrompues. Elles ont tout d'abord été rétablies par la jachère, temps long de repos des terres après quelques années de culture qui permettait, par un recru naturel (repousse du bois après la coupe) et un arrêt des exportations, de restaurer lentement ces fonctions. Avec l'augmentation des densités de populations et le besoin de cultiver les terres en continu, ces fonctions ont finalement été assurées au moyen d'intrants de synthèse, apportant les éléments minéraux manquants par des fertilisants concentrés et contrôlant les bioagresseurs avec des pesticides.

Ainsi, depuis ses origines, et avec des intensités variables, l'agriculture a profondément marqué les écosystèmes sur l'ensemble de la planète.



Plantation de cacaoyer au Brésil, dans l'État de Bahia, sous l'ombrage d'une forêt diversifiée.

LES AGRICULTURES MODERNES DEVANT DE NOUVELLES IMPASSES

Les agricultures modernes constituent souvent des écosystèmes extrêmement simplifiés reposant sur un nombre très limité d'espèces productives et sur l'usage d'énergie fossile et d'intrants chimiques externes. L'usage massif d'intrants chimiques génère d'importants impacts environnementaux et sanitaires dans de nombreuses régions du monde. Les exemples abondent : dégradation des sols viticoles par plusieurs décennies de monoculture et d'usage massif des désherbants, pollutions chroniques dans les bananeraies intensives dues à des pesticides persistants, etc.

LES PLANTES DE SERVICE

Les plantes de service sont des plantes qui sont introduites dans les systèmes de culture avec l'objectif de rétablir ou de renforcer un ou des services de régulation de l'agrosystème, sans en espérer donc de production de biens marchands. Elles engendrent des modifications physiques (structure physique et chimique du sol) et biologiques du milieu pour opérer ces régulations. Elles sont ainsi par exemple de plus en plus employées dans divers systèmes de culture comme les bananeraies et les vergers pour lutter contre les adventices, et *in fine* limiter

l'utilisation des herbicides. Mais l'ajout d'une plante de couverture modifie le fonctionnement global du système tant au niveau des cycles de l'eau et des nutriments que des interactions entre les communautés d'insectes et de micro-organismes. L'utilisation de plantes de service s'est également développée dans les cultures annuelles. L'association d'espèces annuelles comprend de nombreuses techniques dont les systèmes sous couverture végétale. Le semis direct sous couvert végétal, pratique liée à l'agriculture

de conservation, vise à maintenir une couverture végétale permanente du sol, et à restreindre le travail du sol à la seule ligne de semis. Cette pratique réduit ainsi l'érosion et renforce l'activité biologique du sol, contribuant à la gestion durable de la matière organique du sol. La technique de semis direct sous couvert végétal s'est répandue dans de nombreuses situations tropicales (Afrique, Amérique du Sud, Asie du Sud-Est notamment) mais aussi en France et dans beaucoup de zones tempérées.

À une échelle globale, beaucoup d'écosystèmes sont ainsi touchés, avec une perte mondiale de biodiversité (26 000 espèces disparaissent annuellement, un taux d'extinction 100 fois plus élevé que le taux naturel), une contribution importante de l'agriculture au réchauffement global (le système alimentaire mondial est responsable du tiers des émissions globales de gaz à effet de serre) et des conséquences néfastes directes pour les activités humaines (pollution des eaux, développement de maladies, etc.). Dans ce contexte, de nouvelles voies doivent être trouvées pour les agricultures du futur.

VERS DES AGROSYSTÈMES QUI MIMENT LES ÉCOSYSTÈMES NATURELS

Le défi majeur de la recherche d'alternatives aux modèles agricoles issus de la révolution verte réside dans le rétablissement des fonctions de régulation des écosystèmes naturels, tout en maintenant la capacité d'exportation des agrosystèmes. Une nouvelle stratégie, la démarche agro-écologique, repose précisément sur le principe d'imitation des écosystèmes naturels (Malézieux, voir Savoir +). La démarche consiste donc principalement à introduire et à piloter une biodiversité fonctionnelle, cultivée et associée, dans les agrosystèmes intensifs, de manière à tirer profit (en termes de services écosystémiques) de cette introduction ou réintroduction (Malézieux et al., « Mixing plant species... », voir Savoir +). Selon les espèces et modalités d'implantation choisies, l'introduction de biodiversité permet : d'utiliser la complémentarité des traits fonctionnels entre les différentes espèces pour un usage plus efficient des ressources ; de protéger la surface du sol en lui assurant une couverture pérenne ; de mobiliser les régulations naturelles des bioagresseurs en enrichissant les réseaux trophiques ; d'utiliser les substances naturelles attractives et répulsives produites par les plantes pour le contrôle des bioagresseurs.

L'artificialisation et la simplification des agrosystèmes issus de la révolution verte ont entraîné une simplification de leur gestion : à un problème posé, il existe des solutions toutes faites, déployées en particulier par les vendeurs d'intrants. Cette approche d'ingénierie a permis de planifier et de mécaniser les travaux et d'augmenter la productivité du travail et ainsi les surfaces gérées par un producteur.

La réintroduction de complexité dans ces systèmes pose alors des questions essentielles de gestion des connaissances pour leur conception et leur pilotage. Une partie des connaissances est détenue par les producteurs eux-mêmes, sources d'innovation essentielle en agroécologie et en particulier les producteurs des zones tropicales où les systèmes diversifiés continuent d'exister à grande échelle. La capitalisation des connaissances acquises dans des conditions diverses et la définition de principes fondateurs de la théorie agroécologique sont au centre des défis actuels de la recherche, et c'est également dans cette direction que la

LES SYSTÈMES AGROFORESTIERS

Les systèmes agroforestiers sont des systèmes cultivés qui associent plusieurs strates (au minimum une strate arborée à une strate herbacée). Ils incorporent une diversité spécifique souvent élevée. Les systèmes agroforestiers ne sont pas une spécificité tropicale : ils étaient très répandus dans les zones tempérées et méditerranéennes avant l'introduction de la mécanisation et connaissent un nouvel essor aujourd'hui. Dans les zones tropicales, ils sont très présents dans de nombreuses petites exploitations familiales. Ils font l'objet d'un intérêt croissant de la communauté scientifique internationale.

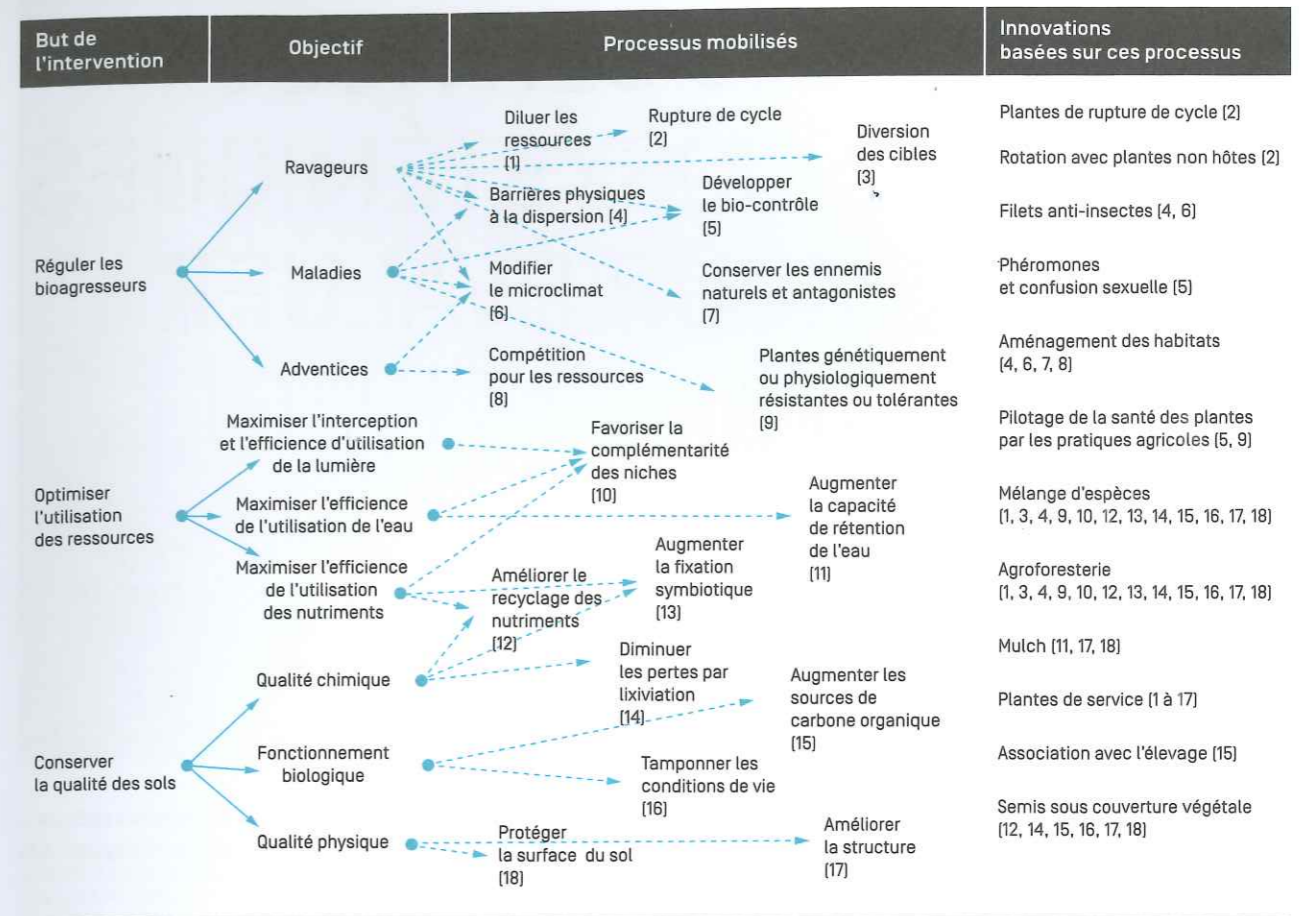
Les exemples les plus répandus d'agroforesterie dans le monde sont représentés par les associations de plantes pérennes, c'est-à-dire la plantation de cultures pérennes (en particulier cacaoyers, caféiers, hévéas, cocotiers) en association avec d'autres espèces pérennes.

La tolérance à l'ombrage de certaines espèces cultivées – caféier, cacaoyer originaires des sous-bois – explique ces associations. Selon le cas, la strate supérieure peut être constituée d'arbres venant de forêts éclaircies – on parle alors d'agroforêts – ou de plantations spécifiques d'arbres d'ombrage, au moment de la plantation de la culture pérenne.

Les systèmes agroforestiers en zone tropicale humide et subhumide assurent à la fois la subsistance des populations locales et d'importantes fonctions environnementales et socio-économiques. Caractérisés par une diversité biologique planifiée élevée (l'agriculteur prévoit et gère un nombre important d'espèces végétales), une forte hétérogénéité structurelle du système, une évolution significative de la structure de la végétation sur un pas de temps long et la fourniture de nombreux services écosystémiques, les systèmes agroforestiers en zone humide offrent un exemple marquant de durabilité reposant sur le rôle de la biodiversité.

communauté scientifique se mobilise. La révolution numérique constitue aussi une source potentielle de progrès, tant par la multiplication des capteurs, qui automatisent les observations à des échelles très diverses, que par le développement d'applications informatiques d'aide à la prise de décision dans beaucoup de domaines.

L'introduction de diversité pour rétablir des services écosystémiques doit se raisonner de manière globale, et s'appliquer en particulier à différents niveaux d'organisation : parcelle, exploitation, terroir. Pour la gestion des bioagresseurs, le problème se pose en termes de gestion de populations, dans l'espace et dans le temps, en recherchant des solutions à court et à long terme, ce qui conduit à prendre



en considération la gestion des habitats des espaces cultivés ou non en même temps que la gestion des dynamiques des populations des bioagresseurs et de leurs agents de contrôle à l'échelle de la parcelle cultivée. Cette inclusion d'échelles supérieures dans les raisonnements est également nécessaire pour la gestion des cycles des éléments nutritifs et la préservation de la qualité des sols, avec des transferts naturels ou anthropiques, par exemple par l'intermédiaire de l'association agriculture-élevage.

La connaissance scientifique des écosystèmes et une nouvelle vision des agrosystèmes peuvent permettre une gestion rationnelle des ressources exploitables, assurant à la fois l'activité économique et un maintien des services écosystémiques.

Cette nouvelle révolution de l'agriculture, nommée il y a quelques années la révolution « doublement verte » (Griffon, voir Savoir +) est obligatoire, car l'avenir de notre planète commune en dépend. Toutefois, elle ne se fera pas sans que se mettent en place les marchés agricoles et de services qui permettront à ces nouveaux systèmes de rémunérer correctement les producteurs. Ces marchés se développent dans des pays du Nord et du Sud, mais encore trop timidement. La mobilisation de nos sociétés doit s'intensifier pour accélérer cette évolution. ■■

Concepts et processus mobilisés en agroécologie dans le but de réduire l'utilisation d'intrants chimiques.

Source : Éric Malézieux, Bruno Rapidel, François-Régis Goebel, Philippe Tixier, « Des processus de régulation naturelle à l'innovation technique, quelles solutions agro-écologiques pour les agricultures du Sud ? », François-Xavier Côte, Emmanuelle Poirier-Magona et al. (dir.), *La transition agro-écologique des agricultures du Sud*, Quae, Versailles, 2018, p. 286-312.

SAVOIR +

Griffon Michel, *Qu'est-ce que l'agriculture écologiquement intensive ?*, Quae, Versailles, 2013.

Malézieux Éric, « Designing cropping systems from nature », *Agronomy for Sustainable Development*, n° 32, vol. 1, 2012, p. 15-29.

Malézieux Éric, Crozat Y., Dupraz Christian et al., « Mixing plant species in cropping systems: concepts, tools and models. A review », *Agronomy for Sustainable Development*, n° 29, 2009, p. 43-62.

Malézieux Éric, Rapidel Bruno et al., « Des processus de régulation naturelle à l'innovation technique, quelles solutions agroécologiques pour les agricultures du Sud ? », in Côte François-Xavier, Poirier-Magona Emmanuelle et al. (dir.), *La Transition agroécologique des agricultures du Sud*, Quae, Versailles, 2018, p. 286-312.

LES SERVICES ÉCOSYSTÉMIQUES POUR ÉVALUER NOTRE IMPACT

Par Alexandra Langlais,
chargée de recherche CNRS,
Institut de l'Ouest : droit
et Europe (CNRS/faculté de droit
et de science politique
de l'université de Rennes 1)

La notion de services écosystémiques invite à penser notre rapport à la nature en termes économiques. Son ambition est de mieux gérer les ressources dont nous dépendons.

■ **LA CARACTÉRISATION DE L'IMPACT HUMAIN** sur les écosystèmes (définis à l'article 2 de la Convention sur la diversité biologique de 1992) se traduit souvent par une litanie d'atteintes perpétrées par les activités humaines. Ces atteintes sont visibles à l'échelle planétaire. L'influence anthropique comme cause principale du réchauffement climatique a été expressément formulée dans le 5^e rapport du GIEC (groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat) en 2013. Un constat similaire s'impose au sujet de l'effondrement de la biodiversité. Dans son rapport de 2019, l'IPBES (plateforme intergouvernementale sur la biodiversité et les services écosystémiques), mettait l'accent sur la menace d'extinction d'un million d'espèces ainsi que sur les facteurs à l'origine de cette menace, lesquels sont éloquentes (les trois quarts de l'environnement terrestre et environ 66 % du milieu marin ont été significativement modifiés par l'action humaine, par exemple). De nombreux écosystèmes locaux l'attestent : les mares, les prairies, les zones humides, touchées par une pollution ou par une modification de l'usage des sols.

L'impact des activités humaines est tel que l'on parle désormais d'anthropocène pour qualifier la période de l'histoire de la Terre à partir de laquelle l'influence de notre espèce sur son milieu a commencé à le transformer radicalement. Le concept de « limites planétaires » cherche également à préciser cet impact croissant des activités humaines en caractérisant les limites biophysiques à ne pas dépasser sous peine de ne pouvoir garantir un écosystème viable à l'humanité. Sur les neuf items identifiés – parmi lesquels on retrouve le changement climatique, les pertes

de biodiversité, l'usage des sols, l'acidification des océans –, plusieurs sont déjà considérés comme ayant dépassé les seuils limites.

DÉPENDANCE HUMAINE ET PROTECTION DES ÉCOSYSTÈMES

Cet impact destructeur est à la hauteur de la dépendance des êtres humains à l'égard des écosystèmes. Sans le légitimer, celle-ci explique qu'ils soient exploités, utilisés, voire qu'ils soient dégradés.

La satisfaction de nos besoins repose sur de nombreuses activités humaines susceptibles de porter atteinte aux écosystèmes tout en étant des activités légalement autorisées (production agricole pour fournir l'alimentation humaine, artificialisation des sols pour construire des habitats...). La manière dont ces activités sont réalisées a un impact différent sur les écosystèmes. Dans le cas de la production agricole par exemple, après la Seconde Guerre mondiale, c'est une logique productiviste entièrement tournée vers une augmentation de la production qui a prédominé, sans qu'on en considère les effets indésirables. Ce mode de production, mis en œuvre au détriment des écosystèmes, était cautionné par le soutien financier de la Politique agricole commune. Par ailleurs, nos besoins peuvent également évoluer en fonction de la société, de l'époque ou des individus.

Pour contrecarrer cette « consommation d'écosystèmes » ou une mauvaise utilisation des écosystèmes, un droit de

Vue aérienne de la déforestation et de la gestion d'une ferme d'élevage au Brésil. La photo montre les différentes étapes de la gestion des terres pour l'élevage de bétail : la forêt est tout d'abord brûlée (parcelle à l'arrière-plan), puis la terre est dégagée (parcelle au premier plan), en attente d'un semis d'herbe de pâture. Sur la droite, un pâturage attend le bétail ; à gauche, une parcelle de forêt encore intacte.

l'environnement protecteur, destiné à lutter contre les dégradations, a émergé. Ce droit s'est érigé contre les activités humaines destructrices en imposant notamment le recours à des pratiques plus respectueuses de l'environnement. La protection juridique de l'environnement a été largement conçue et perçue non pas comme une composante de l'activité humaine mais comme un élément qui lui est extérieur. Dans le cas de l'activité agricole notamment, les obligations qui en découlent ont, dès lors, pu être vécues par les agriculteurs comme de véritables contraintes, et ce, d'autant plus que l'activité de production avait précisément cherché jusqu'alors à s'extraire des exigences de la nature en ayant recours aux produits phytosanitaires ou aux engrais de synthèse.

En vue de réduire les impacts humains sur les écosystèmes, des droits de propriété intellectuelle sur le vivant ont également été aménagés aux côtés du droit de l'environnement. Le brevet, titre de propriété intellectuelle délivré par les pouvoirs publics ou par une autorité reconnue par l'État, constitue l'une des formes les plus courantes de ces droits : il confère à son propriétaire un monopole temporaire d'exploitation sur l'invention (de produit ou de procédé). Ce

mécanisme est au cœur de la lutte contre la biopiraterie, c'est-à-dire contre l'appropriation par une entreprise de ressources biologiques ou génétiques propres à une région. La convention sur la diversité biologique (CDB) de 1992 s'est en effet fixé trois objectifs : la conservation de la diversité biologique, son utilisation durable et le partage équitable des avantages découlant de l'utilisation des ressources génétiques. Concernant ce dernier objectif, l'exploitation illimitée des ressources génétiques est désormais freinée par un partage des avantages orchestré par un dispositif juridique contraignant né du protocole de Nagoya (voir encadré p. 45). Il s'agit cependant surtout de préserver des intérêts humains, notamment financiers, qui ne garantissent que de façon indirecte la protection des écosystèmes.

L'APPROCHE PAR SERVICES ÉCOSYSTÉMIQUES : UN NOUVEAU PARADIGME

La notion de protection et de conservation des écosystèmes puise sa source dans la prise de conscience de notre dépendance aux écosystèmes. Cependant, leur dégradation continue révèle l'échec des mesures classiques de protection. Un nouvel élan est trouvé autour de la notion de services écosystémiques quand, en 2000, Kofi Annan, secrétaire général de l'ONU, publie son rapport « Nous, les peuples : le rôle des Nations unies au XXI^e siècle » où il préconise « l'évaluation mondiale des écosystèmes ». À sa demande, est ainsi créée l'Évaluation des écosystèmes pour

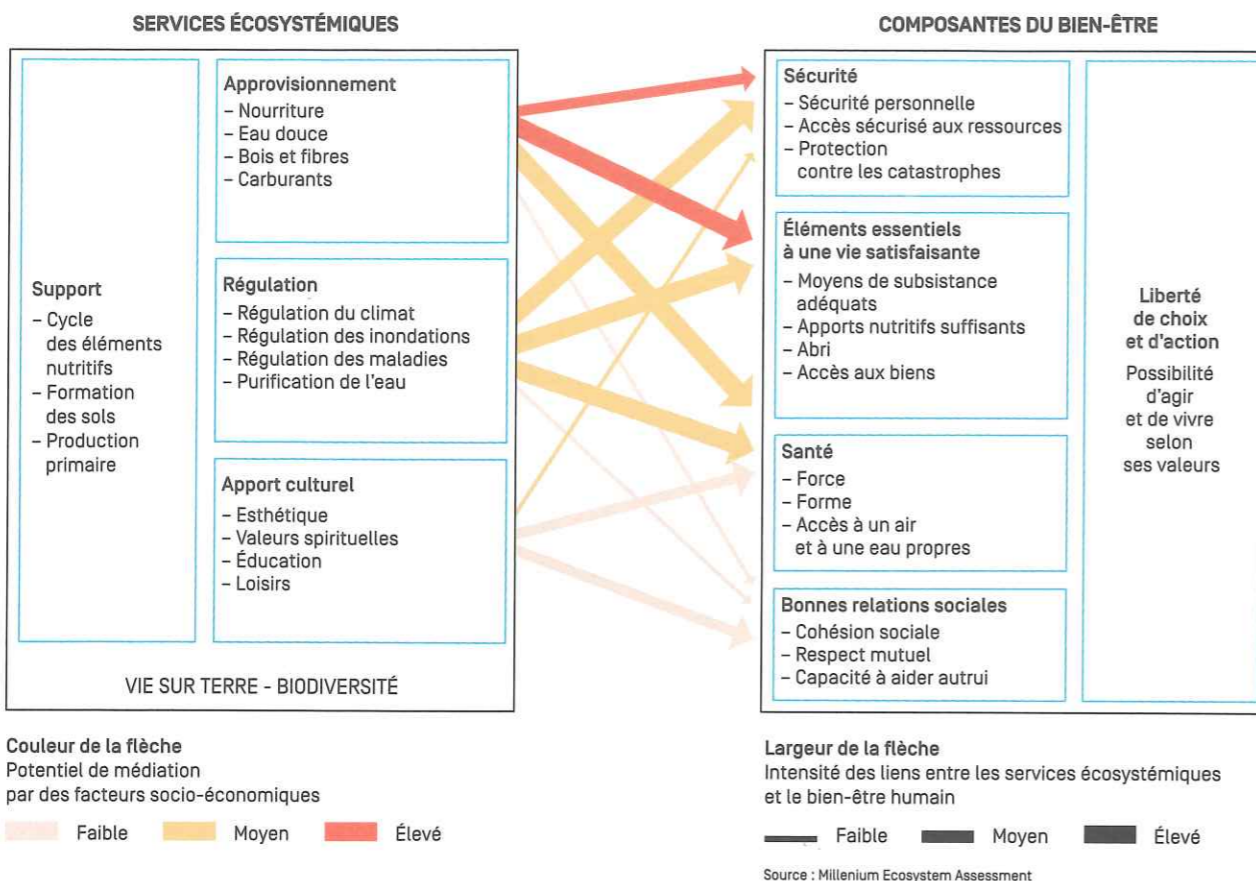


Schéma conceptuel des interfaces entre l'écosystème et l'humain.

Source : d'après GRID-Arendal

le millénaire (Millennium Ecosystem Assessment, MEA), un groupe de travail qui « a pour objectif d'évaluer les conséquences des changements écosystémiques sur le bien-être humain ; elle doit également établir la base scientifique pour mettre en œuvre les actions nécessaires à l'amélioration de la conservation et de l'utilisation durable de ces systèmes, ainsi que de leur contribution au bien-être humain » (site du MEA, « À propos de l'EM »). Depuis la diffusion des rapports d'évaluation du MEA en 2005, cette prise de conscience s'est matérialisée par un message clé selon lequel nous dépendons des services rendus par les écosystèmes pour notre bien-être. Ce nouveau cadre conceptuel marque une approche différente de la relation de l'être humain à la nature. Bien que critiquée par son caractère anthropocentrée et utilitariste, cette vision s'impose désormais comme un nouveau paradigme, nous amenant à repenser les impacts humains sur l'écosystème.

Que nos besoins soient objectifs et universels (soit à la base de la pyramide des besoins selon Maslow et la théorie substantialiste) ou qu'ils soient socialement déterminés (selon les théories socioculturelles), leur satisfaction repose

largement sur les apports fournis par les écosystèmes. Pour souligner le lien entre l'humain et les écosystèmes, sont alors mis en miroir les services offerts par les écosystèmes (approvisionnement tels que la fourniture de nourriture ou de bois ; régulation climatique, des inondations et support tels que la formation et la stabilité des sols ; services culturels et spirituels tels que les loisirs récréatifs en forêt, les valeurs esthétiques ou encore l'enrichissement spirituel) et le bien-être procuré aux humains. En mettant en relief ce lien, c'est également le bon fonctionnement des écosystèmes qui est mis sous les feux de la rampe. Or, celui-ci ne repose pas uniquement sur la préservation d'espèces rares et menacées, il compte également largement sur la biodiversité ordinaire, abondante, commune et donc non menacée d'extinction. Pour cette raison, elle est aussi largement exclue des mesures de protection. Cependant, on constate désormais un déclin inquiétant de ces espèces, comme le rapportent plusieurs études dédiées aux insectes communs ou aux oiseaux de jardin.

Bien que l'approche par service renvoie à une certaine personnification dans la représentation des écosystèmes (ils « rendent des services »), celle-ci n'est pas traduite en droit : un écosystème n'est pas une personne morale, qui aurait des droits. La reconnaissance de droits à la nature était pourtant déjà au cœur de la célèbre publication de

LE PROTOCOLE DE NAGOYA ET LES BREVETS SUR LE VIVANT

L'enjeu de ce protocole, adopté en 2010, est de concilier, d'une part, l'exploitation commerciale des ressources par un aménagement de l'accès aux ressources en faveur des utilisateurs et, d'autre part, l'organisation du partage des bénéfices avec les utilisateurs traditionnels de ces ressources. Plusieurs ONG contestent toutefois ce dispositif au nom de la réalité du partage des bénéfices. De plus, l'exclusivité conférée au brevet est souvent vécue comme un pillage par les pays, particulièrement par les populations locales habitant dans des territoires riches en biodiversité. Enfin, du point de vue éthique, le simple fait de s'approprier le vivant – qui, avant le développement des biotechnologies, ne pouvait faire l'objet de privatisation – reste toujours en débat.

Christopher Stone de 1972 : « Should trees have standing? ». En tant que sujet susceptible d'être lésé par des actes humains, la nature devrait donc être capable de protéger juridiquement ses intérêts (sa capacité de résilience, sa régénération ou encore sa non-destruction). Loin d'être cantonnées à une vision théorique, plusieurs consécutions des droits de la nature ont d'ores et déjà émergé : la constitution équatorienne place par exemple la Pachamama (terre mère) au cœur de son texte. Notons d'ailleurs qu'il ne s'agit pas d'une vision strictement amérindienne, puisque des droits de la nature sont reconnus par exemple en Inde ou en Nouvelle Zélande.

Se focalisant sur l'intérêt pour l'humain, l'approche par services écosystémiques attribue une valeur instrumentale (une valeur reflétant sa contribution au bien-être humain) à la nature, par opposition à une valeur intrinsèque, qui serait absolue, indépendante de son utilité pour les êtres humains. Elle peut s'appuyer sur une évaluation économique pour rendre économiquement visible, ce qui semblait préalablement gratuit. Cette approche portée par les travaux de Robert Costanza (voir Savoir +) a reçu un écho politique important, comme peut en témoigner l'étude réalisée par le TEEB (The Economics of Ecosystems and Biodiversity), qui promeut l'intégration des valeurs économiques de la biodiversité et des services rendus dans les processus de décision. Elle s'appuie à cet effet sur la notion de « capital naturel », représenté sous la forme d'un stock dispensant un flux de services. Le concept met en exergue un équilibre entre une meilleure prise en compte des impacts négatifs de l'humain sur les écosystèmes et un soutien de leur action positive. Ce jeu repose sur l'articulation entre les services écosystémiques, rendus par la nature à l'humain, et les services environnementaux, rendus par les humains à la nature.

D'un côté, le recours aux services écosystémiques permettrait de mieux évaluer les impacts négatifs de l'humain sur les écosystèmes en déterminant de façon plus réaliste le coût de la destruction de notre environnement. C'est en effet surtout au moment de leur perte, et donc lors de la détérioration des écosystèmes, que les services écosystémiques sont juridiquement pris en compte. Par exemple, c'est dans le cadre de la prévention et de la réparation des dommages environnementaux que la notion de services est abordée (directive du 21 avril 2004 sur la responsabilité environnementale). De même, par une décision rendue le 2 février 2018, la Cour internationale de justice, dans une affaire opposant le Nicaragua et le Costa Rica, a pour la première fois décider d'allouer une réparation pour la dégradation des biens et services rendus par la nature, en sus des frais de restauration de la nature atteinte. La Cour a toutefois refusé d'opter pour la méthode dite « des services écosystémiques » comme méthode d'évaluation monétaire des dommages environnementaux de cette affaire. L'évaluation monétaire des services a été médiatisée par un autre cas, relatif au service de pollinisation : en 2005, celui-ci a été estimé à 153 milliards d'euros à l'échelle mondiale. Les modalités de calcul de ces référentiels monétaires avaient fait l'objet de controverses et restent sujettes à discussion aujourd'hui pour l'ensemble des services écosystémiques.

D'un autre côté, les services environnementaux contribueraient à « recapitaliser » le capital naturel en préservant la capacité des écosystèmes à nous fournir des biens et des services. La mesure de cet effort humain en faveur des services écosystémiques repose également sur une forme d'évaluation monétaire, dès lors que ces services s'adosent à un paiement : on parle alors de paiements pour services environnementaux. ■■

SAVOIR +

Convention des Nations unies sur la diversité biologique, 5 juin 1992. [En ligne] www.cbd.int/doc/legal/cbd-fr.pdf

Directive 2004/35/CE du Parlement européen et du Conseil sur la responsabilité environnementale en ce qui concerne la prévention et la réparation des dommages environnementaux, *Journal officiel* n° L 143, 30 avril 2004, p. 56-75. [En ligne] <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FR/TXT/?uri=celex:32004L0035>

Arnould de Sartre Xavier, Castro Monica et al., *Political ecology des services écosystémiques*, Peter Lang, Bruxelles, 2014.

Costanza Robert et al., « The value of the world's ecosystem services and natural capital », *Nature*, n° 387, 1997, p. 253-260.

Langlais Alexandra, « À la recherche d'une définition juridique des paiements pour services environnementaux? », in Alexandra Langlais (dir.), *L'Agriculture et les paiements pour services environnementaux : quels questionnements juridiques?*, PUR, Rennes, 2019, p. 31-57.

Méral Philippe, Pesche Denis, *Les Services écosystémiques : repenser les relations nature et société*, Quae, 2016.

TEEB, *L'Économie des écosystèmes et de la biodiversité : intégration de l'économie de la nature. Une synthèse de l'approche, des conclusions et des recommandations de la TEEB*, 2010. [En ligne] www.teebweb.org

CULTIVER LA DIFFÉRENCE

Par Cyrille Violle,
directeur de recherche au CNRS,
UMR 5175 CEFE, Montpellier

Utiliser la biodiversité pour limiter le recours aux intrants et l'effet des aléas climatiques sur les cultures est fondé, mais les mécanismes restent encore mal compris.

■ L'AGRICULTURE fait aujourd'hui face à de nombreux défis, tant économiques, sociétaux qu'environnementaux. Un des enjeux est la maîtrise des rendements agricoles dans un contexte de plus en plus incertain du fait des changements globaux en cours et à venir. Des réponses diamétralement opposées sont proposées : d'un côté, un recours à la biotechnologie, en particulier via la recherche de gènes susceptibles de proposer des cultures à la fois productives et résistantes aux aléas climatiques ; de l'autre, un appel à un retour aux « principes de la Nature » dans l'espoir d'une utilisation « optimale » des ressources au sein de la culture – en postulant que ce principe d'optimisation opérerait dans les écosystèmes naturels. De telles solutions clés en main n'existent pas (encore). Un bouquet de solutions, en fonction du contexte et qui combinerait des technologies de pointe et la prise en compte des mécanismes écologiques qui régulent les processus naturels, serait plus envisageable (et souhaitable).

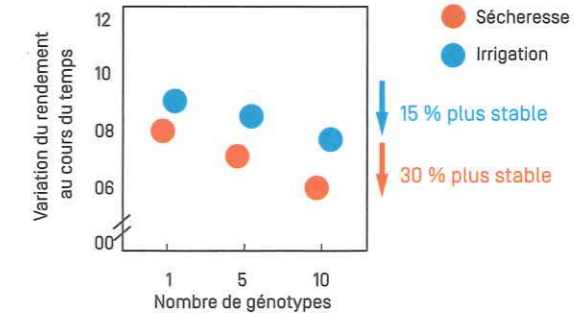
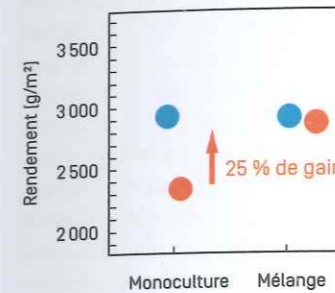
LA BIODIVERSITÉ AU SERVICE DES RENDEMENTS AGRICOLES ?

L'idée de manipuler la biodiversité d'une parcelle pour réguler le rendement s'appuie sur une littérature foisonnante en écologie qui traite de la relation biodiversité et fonctionnement des écosystèmes. De très nombreux travaux expérimentaux et théoriques ont en effet discuté du rôle, supposé positif, de la biodiversité sur la productivité d'un écosystème (ainsi que sur d'autres processus écosystémiques) (Cardinale et al., voir Savoir +). Une hypothèse classique pour expliquer la relation positive entre biodiversité et productivité de l'écosystème est qu'un écosystème diversifié est composé d'espèces (ou de génotypes) qui utilisent les ressources de façon complémentaire. On parle de complémentarité de niches écologiques. Toutefois, cette relation positive n'a été que peu fréquemment rencontrée dans la



La culture conjointe des « trois sœurs » [courge, maïs et haricot grimpant], culture amérindienne traditionnelle, représentée sur une pièce de 1 dollar américain.

nature. Les raisons sont multiples, mais il est surtout important de garder à l'esprit que la sélection naturelle n'agit pas à l'échelle de l'écosystème mais de l'individu (et plus précisément des gènes). Il n'y a *a priori* pas de processus d'optimisation et encore moins de sélection qui opéreraient à l'échelle de tout un écosystème. « Mimer la nature » aurait donc ses limites. Cependant, les résultats expérimentaux sont bien réels et les dispositifs expérimentaux mis en œuvre ne sont pas sans rappeler les champs cultivés. En d'autres termes, il semble envisageable d'introduire de la diversité cultivée dans les champs dans le but de maximiser la complémentarité et de favoriser les rendements, à



Effet de la diversité taxonomique et génotypique sur le rendement et la variabilité temporelle du rendement de micro-parcelles de cinq espèces herbacées fourragères cultivées en monoculture ou en mélange. Le rendement est augmenté de 25 % dans les mélanges par rapport aux monocultures dans le traitement « sécheresse ». La stabilité du rendement dans les mélanges augmente avec le nombre de génotypes par espèce, dans le traitement « irrigation » (15 %) mais surtout dans le traitement « sécheresse » (30 %).

Source : Prieto et al., « Complementary effects of species and genetic diversity on productivity and stability of sown grasslands », *Nature Plants*, 2015.

la manière des dispositifs expérimentaux mis en place pour tester le rôle de la biodiversité sur le fonctionnement des écosystèmes naturels.

Il est souvent tenu pour acquis que l'agriculture a banni la diversité au sein des champs depuis la Seconde Guerre mondiale et la révolution verte. Il s'agit d'une vision très caricaturale de la situation, des situations pour être précis. Il existe en effet aujourd'hui une diversité très grande de systèmes agricoles et, pour certains, la diversité en est une composante inhérente, par exemple dans les prairies temporaires. Mélanger une céréale et une espèce légumineuse pourvoyeuse d'azote est également un grand classique en agronomie. Historiquement, la culture conjointe des « trois sœurs » (courge, maïs et haricot grimpant) est emblématique des pratiques culturelles traditionnelles amérindiennes. Pour autant, il est évident que l'agriculture intensive a très largement parié sur des variétés performantes (on parle d'« idéotypes ») cultivées seules (en « monoculture »). C'est le cas des cultures céréalières en particulier. Même les prairies qui, par nature, sont composées de différentes espèces restent peu diversifiées.

Pourtant, une étude récente (Prieto et al., voir Savoir +) suggère que des prairies riches en espèces et en génotypes seraient plus productives et leur rendement moins soumis aux aléas climatiques. Pour démontrer cela, les auteurs ont mis en place une expérimentation dans laquelle cinq espèces herbacées fourragères ont été cultivées en monoculture ou en mélange en conditions bien irriguées ou en simulant des événements de sécheresse. Chaque espèce est représentée par 10 génotypes (clones) dans les monocultures. Dans les mélanges, le nombre de génotypes par espèce variait de 1 à 10. Les auteurs ont montré une augmentation

significative du rendement dans les mélanges par rapport aux monocultures dans le traitement « sécheresse », et une augmentation de la stabilité temporelle du rendement avec le nombre de génotypes dans les deux traitements. Pour résumer, augmenter le nombre d'espèces et la diversité génétique au sein de ces espèces pourrait être un levier de choix pour relever le défi climatique majeur imposé aux agriculteurs : améliorer le rendement de leurs cultures dans un environnement changeant et incertain, tout en favorisant des pratiques agricoles respectueuses de l'environnement (limitation des herbicides, engrais, etc.). Ce travail est au cœur des enjeux actuels posés par l'agroécologie dans un contexte de transition écologique de l'agriculture. Il suggère aussi un changement radical de paradigme dans la conception des schémas de sélection variétale, dans lesquels la biodiversité n'est pour le moment pas prise en compte.

FAVORISER LES DIFFÉRENCES

Mobiliser les « principes de la nature » dans une perspective écologiquement intensive est une ambition partagée par beaucoup. Cependant, les principes écologiques invoqués (par exemple la complémentarité entre espèces ou la coopération) sont souvent tenus pour acquis, alors que leur rôle dans les écosystèmes naturels reste incertain et/ou difficilement quantifiable. À l'échelle de la parcelle agricole, promouvoir la diversité cultivée (par exemple des mélanges de différentes variétés de riz au sein d'une parcelle) est généralement avancé comme une « solution qui s'appuie sur la nature » (Nature-Based Solutions, NBS) pour pallier une diminution d'intrants (pesticides, fertilisation, etc.). Dans ce cas,

hypothèse est faite que les interactions entre variétés pourraient être « optimisées » au sein de ces mélanges variétaux. Une complémentarité entre variétés en mélange permettrait à chacune d'entre elles d'utiliser différemment les ressources (par exemple l'eau ou le phosphore), donc de limiter les interactions négatives entre elles, ce qui permettrait *in fine* une meilleure utilisation globale des ressources d'une parcelle, et donc un meilleur rendement. Cependant, les travaux en écologie ont rarement pu expérimentalement quantifier la complémentarité entre espèces à cause de nombreux facteurs complexes et parfois opposés. Par exemple, même si deux espèces en interaction peuvent être complémentaires dans leur façon d'utiliser l'eau du sol, elles peuvent interférer de façon très « agressive » pour la capture de la lumière.

En écologie, être complémentaire implique d'« être différent ». Mais comment quantifier cette différence ? Une sous-discipline de l'écologie, l'écologie fonctionnelle, s'est particulièrement intéressée à cette question. Elle vise à décrire de façon « fonctionnelle » la biodiversité. L'idée est d'atomiser l'organisme en particules élémentaires, les traits, afin de comprendre son fonctionnement. Le « trait fonctionnel » quantifie une fonction (par exemple un flux métabolique) au sein de l'organisme (Garnier *et al.*, voir Savoir +).

Les traits fonctionnels semblent donc le bon outil pour décrire les plantes et quantifier la complémentarité entre les espèces ou les génotypes. Une étude pilote (Montazeaud *et al.*, voir Savoir +) suggère qu'il serait possible de contrôler finement l'utilisation du phosphore d'un mélange composé de deux génotypes de riz (*Oryza sativa*) pour lesquels seul un gène associé à la profondeur d'enracinement (considérée comme un trait fonctionnel) a été modifié : l'un des génotypes a extrait le phosphore en surface, l'autre plus en profondeur. En d'autres termes, si la complémentarité d'utilisation des ressources est souvent difficile à mettre en évidence dans les milieux naturels, elle pourrait être malgré tout maximisée dans des mélanges variétaux pour lesquels les phénotypes sont parfaitement caractérisés, et choisis (sélectionnés) à bon escient. C'est le pari qu'ont fait Litrico et Violle (voir Savoir +) en proposant un nouveau paradigme pour l'amélioration des plantes, dans lequel il serait possible de sélectionner des mélanges « idéaux » (des « idéomixes » suivant la terminologie des auteurs, en écho au terme traditionnel d'« idéotypes ») via l'élaboration de « règles d'assemblage » qui s'appuieraient sur les différences phénotypiques entre variétés du mélange. Ces règles restent un graal pour l'écologie, et sa quête pourrait trouver une fin heureuse et inattendue en agronomie.

AMÉLIORER LES RENDEMENTS AGRICOLES, MAIS PAS SEULEMENT

Les enquêtes socio-économiques auprès des agriculteurs vont dans le sens de favoriser une utilisation des principes de la nature non pas seulement dans le but d'augmenter

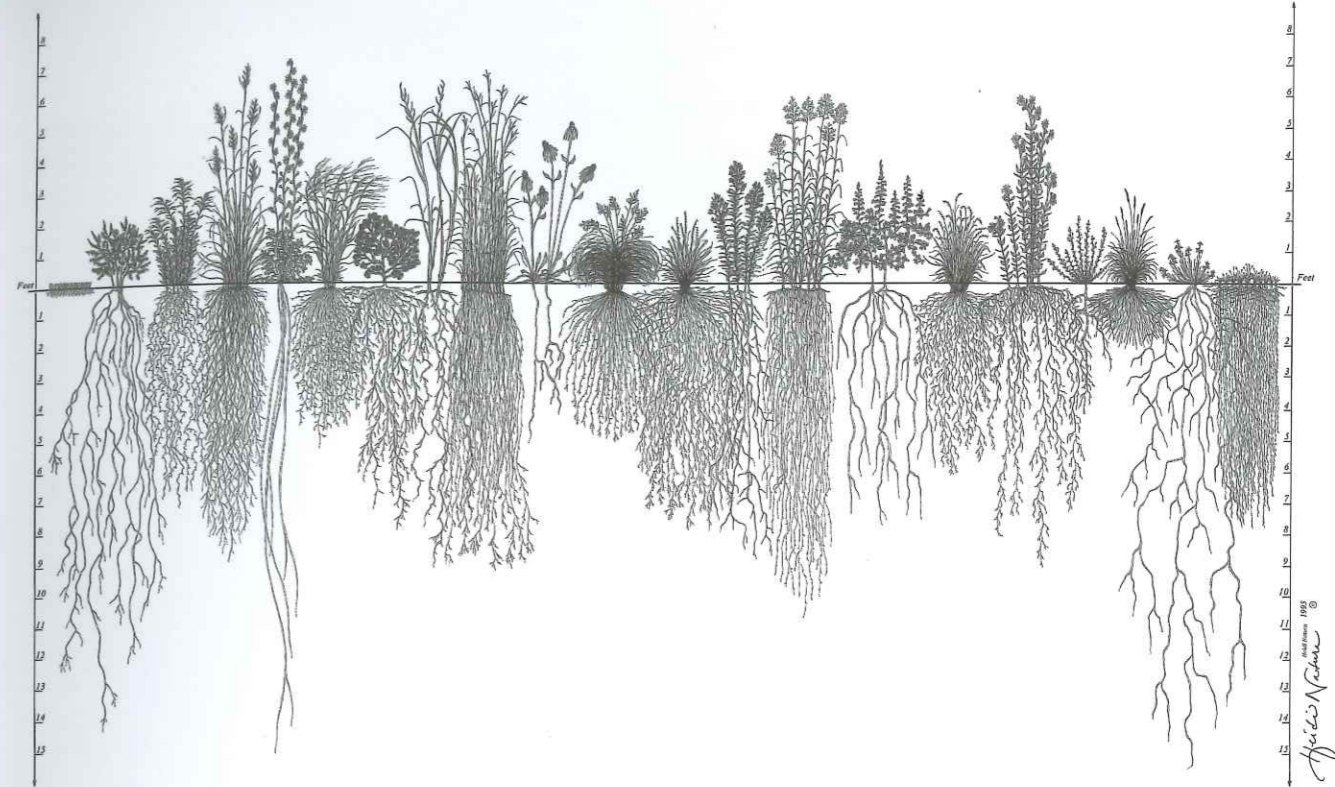
la production (qualité, quantité) mais aussi de la sécuriser dans le temps.

Travailler sur des « règles d'assemblage » des variétés, qui permettraient à la fois de minimiser les risques de maladies et de limiter les pertes de rendement est un front de recherche passionnant. Des obstacles existent, en particulier le compromis entre croissance et défense, souvent avancé en écologie et en évolution, mais rarement mis en évidence sur les plantes cultivées. Si celui-ci est maintenu chez les plantes cultivées, optimiser à la fois le rendement et la résistance aux maladies semble difficile, sauf à envisager une optimisation à l'échelle du mélange variétal via une utilisation réfléchie des différentes composantes du mélange. Des travaux expérimentaux suggèrent des mécanismes de reconnaissance du soi et du non-soi entre plantes en interaction, notamment via l'exsudation racinaire. Des travaux préliminaires ont été menés sur des génotypes de riz en interaction entre eux et avec le champignon pathogène *Magnaporthe oryzae*. Ces résultats suggèrent que des signaux ont pu être échangés entre plantes via les racines et qu'ils ont modifié la physiologie de leur voisin de telle manière que ce dernier est devenu plus résistant à l'attaque du pathogène.

Identifier un comportement dit « altruiste » et le déterminisme génétique et physiologique de l'effet d'un génotype sur l'immunité d'un génotype voisin plus ou moins apparenté serait une avancée importante pour plusieurs disciplines : écologie, évolution, génétique, écophysiologie, biologie végétale, phytopathologie, agroécologie. La théorie de la sélection de parentèle en biologie évolutive suggère que, dans le cas d'une telle réponse altruiste, les génotypes proches génétiquement et phénotypiquement seront avantagés. Il apparaît alors un paradoxe pour les mélanges variétaux : assembler des variétés différentes pourrait permettre d'augmenter le rendement, mais, à l'inverse, la résistance aux pathogènes serait optimisée au sein de mélanges composés de variétés semblables. Le fait de cultiver la différence ne serait donc pas une réponse universelle et optimale à tout contexte.

COUPLER BIOTECHNOLOGIE ET BIODIVERSITÉ : VERS UN CHANGEMENT DE PARADIGME

La diversité est un leitmotiv pour les tenants d'une transition agroécologique de l'agriculture. Certes, parier sur la diversité cultivée, en faisant appel aux principes de l'écologie scientifique, semble prometteur pour mettre en œuvre des cultures innovantes moins dépendantes des intrants agricoles. Cependant, les mécanismes sous-jacents restent très mal connus. Le fait de proposer des cultures conjointes de variétés possédant des caractéristiques phénotypiques (traits fonctionnels) contrastées pourrait être une manière d'optimiser ces mélanges variétaux. Mais d'autres théories, issues de la biologie évolutive, suggèrent au contraire une performance plus importante de mélanges composés de



variétés apparentées. Il n'existe à ce jour pas de consensus, mais les recherches interdisciplinaires sur le sujet sont actuellement très fécondes.

Surtout, il est nécessaire de prendre du recul et d'éviter une image idéalisée et stéréotypée de la nature et de ses bénéfices pour l'agriculture. L'optimisation et l'équilibre ne sont pas des principes de la nature. La complexité, la stochasticité (l'aléatoire) et l'instabilité caractérisent la majorité des écosystèmes naturels. Pour autant, dans des systèmes agricoles simplifiés, il semble prometteur d'optimiser certains mécanismes qui régissent les écosystèmes et leur fonctionnement, tels que la complémentarité de niches entre les espèces ou les génotypes.

Mais une telle transition de l'agriculture risque de bouleverser l'ensemble de la filière agricole, depuis les semenciers jusqu'aux transformateurs. La société ne peut et ne doit pas laisser les agriculteurs porter seuls la responsabilité d'une telle transition. En amont de cette filière, penser la diversité et cultiver la différence est un changement de paradigme radical pour l'amélioration variétale. Cela nécessite notamment de repenser les schémas de sélection et de rechercher des gènes impliqués dans les interactions entre plantes en particulier. La biotechnologie ne peut être écartée d'un tel processus, sans quoi la transition attendue risque d'être cantonnée à des systèmes très particuliers et localisés. Un joli défi pour l'ensemble de la filière et un exemple unique de plateforme de dialogue pour de nombreuses disciplines scientifiques. ■■

Différentes espèces végétales capables de coexister grâce à des systèmes racinaires différents et complémentaires.



SAVOIR +

Cardinale Bradley J., Duffy J. Emmett, Gonzalez Andrew *et al.*, « Biodiversity loss and its impact on humanity », *Nature*, n° 486, 2012, p. 59-67.

Garnier Éric, Navas Marie-Laure, *Diversité fonctionnelle des plantes*, De Boeck, Paris, 2013.

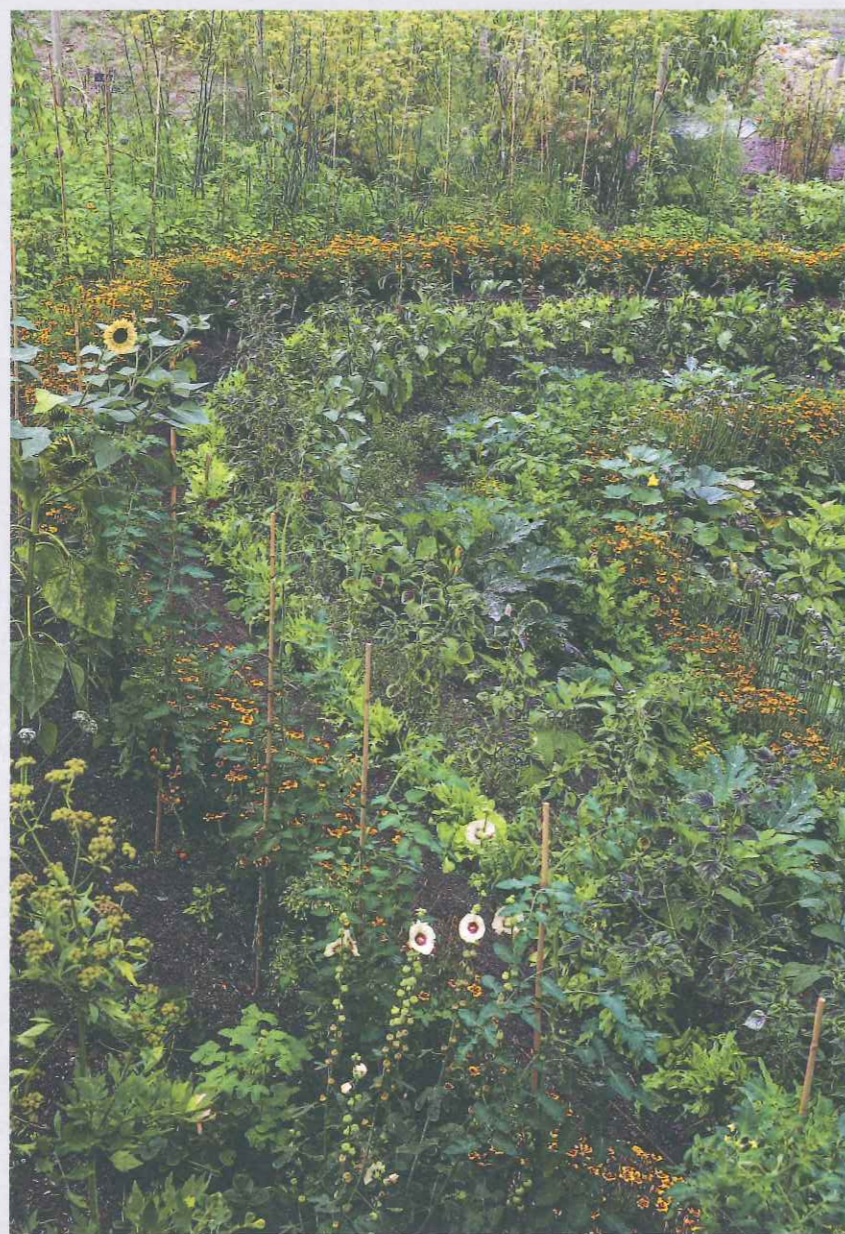
Litrico Isabelle, Violle Cyrille, « Diversity in plant breeding: a new conceptual framework », *Trends in Plant Science*, n° 20, 2015, p. 604-613.

Montazeaud Germain, Violle Cyrille, Fréville Hélène *et al.*, « Crop mixtures: does niche complementarity hold for belowground resources? An experimental test using rice genotypic pairs », *Plant and Soil*, n° 242, 2018, p. 187-202.

Prieto Iván, Violle Cyrille, Barre Philippe *et al.*, « Complementary effects of species and genetic diversity on productivity and stability of sown grasslands », *Nature Plants*, art. n° 15033, 2015.

VIVRE AVEC LE VIVANT

La lente transformation de l'agriculture productiviste vers l'agro-écologie (*via* la réhabilitation du bocage contre l'*openfield*, la polyculture, l'abandon de nombreux pesticides...) est une réponse pour réduire l'emprise destructrice de l'humain sur l'environnement. Érosion des sols, perte de biodiversité, raréfaction de l'eau potable ou encore catastrophes naturelles (tempêtes, sécheresses) de forte intensité sont en effet les conséquences d'une exploitation effrénée de la nature qui a dérégulé les écosystèmes. Il est temps pour l'humanité de vivre avec le vivant sans s'en croire maître et possesseur.



Partout dans le monde de nouvelles modalités d'interaction avec la planète sont envisagées. En Cornouailles, l'Eden Project est une destination d'écotourisme qui explore les différentes façons de travailler pour un avenir meilleur. Au cœur d'une ancienne carrière de kaolin aux paysages dévastés, une nature luxuriante a été développée, créant des synergies durables entre les plantes qui redonnent vie à cet environnement désormais réhabilité.

© Eden Project



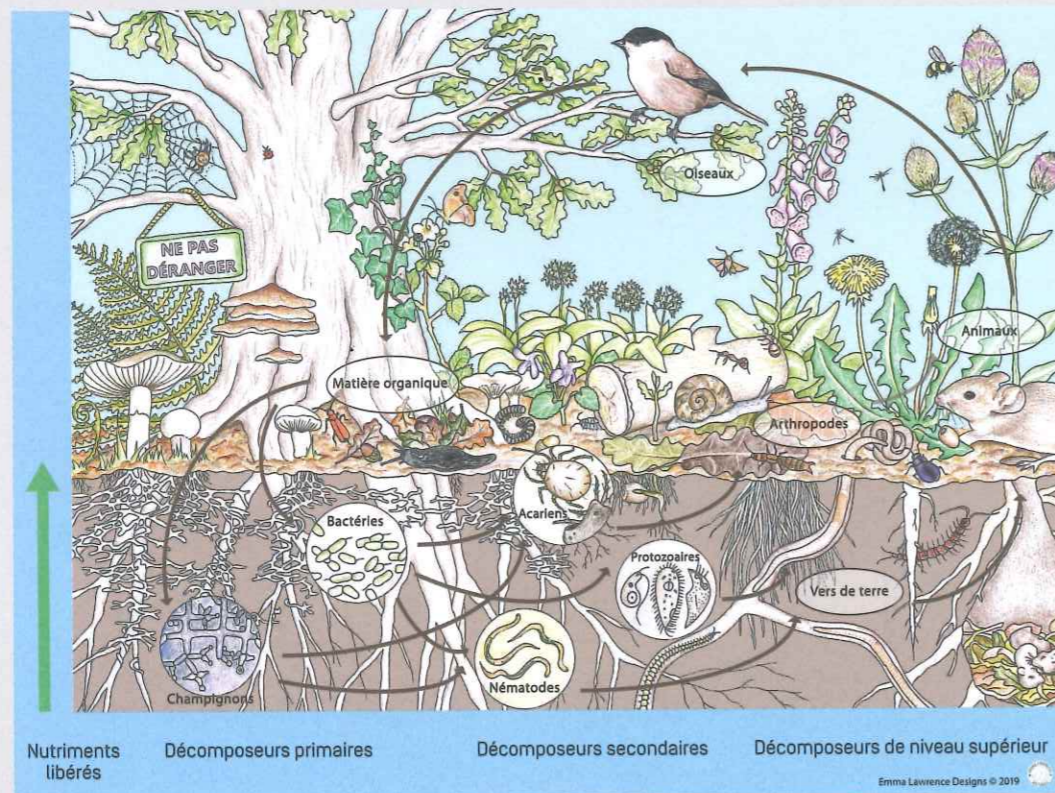
L'*openfield* (ci-contre) a longtemps été le système agricole de référence en France, depuis son apparition après la Seconde Guerre mondiale. Propice à l'agriculture intensive, il a longtemps été perçu comme la réponse idéale à des besoins en nourriture toujours plus élevés. Aujourd'hui remis en question, de plus en plus de régions lui préfèrent le bocage (ci-dessus), système agricole dans lequel les champs sont séparés par des haies ou des taillis et qui présente l'avantage de prémunir les sols de l'érosion, de contenir l'eau et de préserver les écosystèmes, tout en permettant un rendement similaire lorsqu'il est bien exploité.

Ci-contre : © H. Rigel/Biosphoto - Ci-dessus : © Francis Carmon/hemis.fr



Forêt détruite en Corse. Papier et carton, papier toilette, essuie-tout, mouchoirs, mobilier de jardin : le besoin de notre société en fibres de bois est exponentiel et alimente un marché noir qui participe à l'exploitation massive des forêts primaires partout sur le globe. Chaque année 15 millions d'hectares de forêts sont ainsi détruits, les animaux qu'ils abritent et les tribus autochtones sont privés de leurs moyens de subsistance, la diversité végétale réduite à néant. Ce phénomène serait responsable de 20 % des émissions mondiales de gaz carbonique, de l'aggravation de l'effet de serre, d'inondations et de sécheresses extrêmes.

Le cycle de vie du sol. L'écosystème des sols est bien particulier, composé d'innombrables organismes et micro-organismes qui dégradent la matière pour en rendre les nutriments accessibles. Déstabiliser son équilibre naturel (par des labours trop répétitifs, par des fongicides, etc.) n'est pas sans conséquences pour l'ensemble du système.



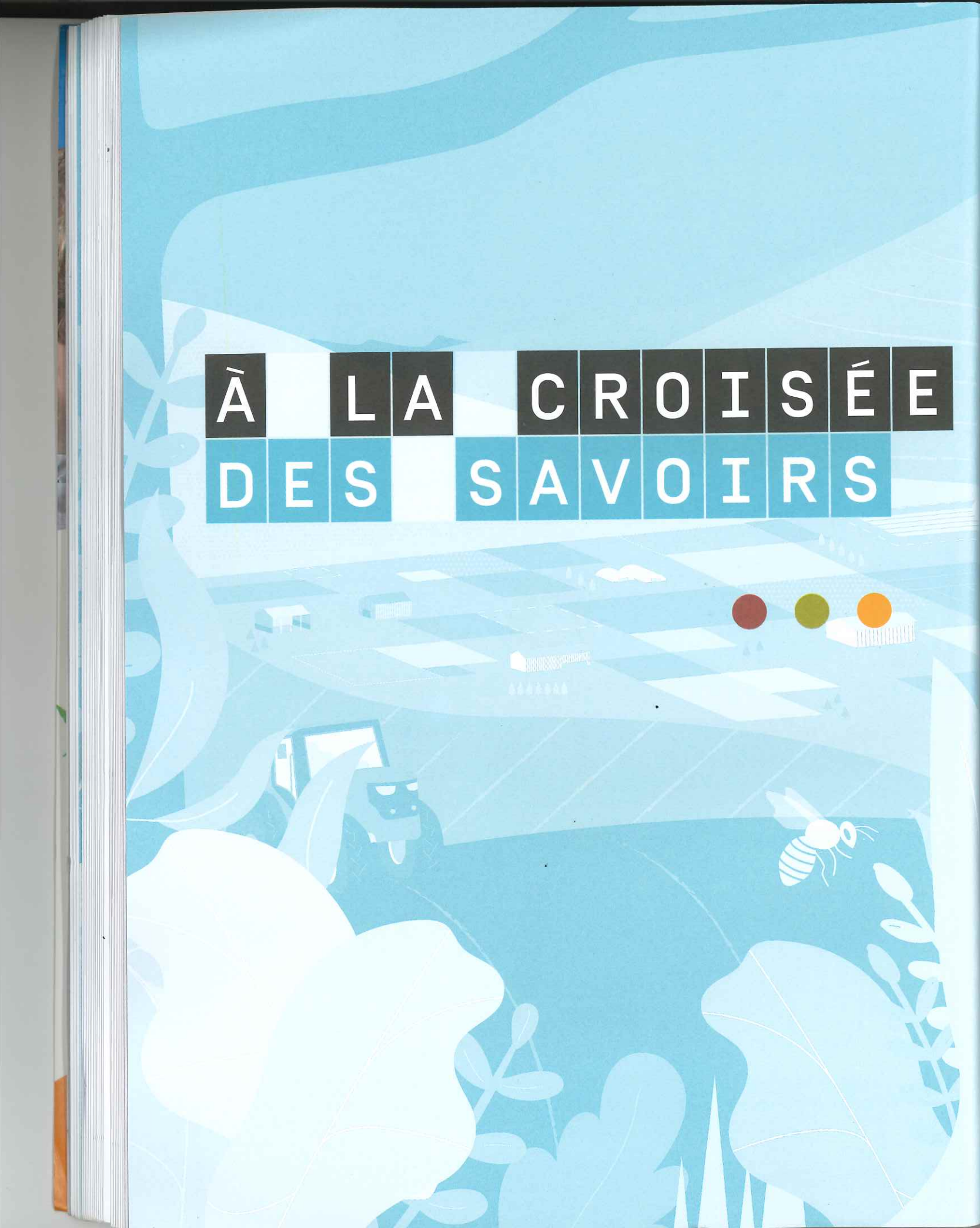
Emma Lawrence Designs © 2019



La bergeronnette printanière, dont nous entendons le chant au printemps, est une espèce protégée. Deux études récentes menées par le Muséum national d'histoire naturelle sur tout le territoire français et par le CNRS, à l'échelle locale, dressent un constat alarmant sur le déclin des oiseaux vivant en milieu agricole. Leurs populations ont perdu un tiers de leurs effectifs en 17 ans du fait de l'agriculture intensive et de l'utilisation massive de pesticides qui portent une grave atteinte à la biodiversité.



En 2019, un être humain sur dix n'a pas accès à l'eau potable, ici dans le désert du Thar, au Rajasthan (Inde). Les femmes et les jeunes filles (très rarement les hommes) doivent effectuer chaque jour une distance de plusieurs kilomètres à pied pour collecter l'eau nécessaire à la survie de leur famille. Outre les répercussions physiques (les corps sont traumatisés par les kilomètres effectués à porter des conteneurs d'eau de plusieurs litres sur la tête), cet état de fait bloque l'accès des jeunes filles à l'éducation et alimente les discriminations de sexe. Selon l'ONU et l'Unicef, l'amélioration des conditions d'accès à l'eau potable dans les régions les plus défavorisées est un enjeu majeur des années à venir.



À LA CROISÉE DES SAVOIRS

HISTOIRE - GÉOGRAPHIE

- 56 SUCRE ET POLITIQUE, DE LA CANNE À LA BETTERAVE
Marcel Dorigny

LETTRES

- 60 HENRY DAVID THOREAU ET LE « NATURE WRITING »
François Specq
- 64 DÉFENSE ET ILLUSTRATION DE L'ENVIRONNEMENT
Pierre Schoentjes

ARTS

- 68 POUR UN ART DE LA PRÉSENCE
Marianne Lanavère

CRÉDITS PHOTOGRAPHIQUES

57. © Editions Autrement 58. © Ville de Saint-Denis 59. © Musée Carnavalet/Roger-Viollet 60. © John Tlumacki/Le Boston Globe/Getty Images
61. © Bridgeman Images/Leemage 63. © John Tlumacki/Le Boston Globe/Getty Images 64-65. © Titus Simoens 67. © Benjamin Lowy/Getty
Images 69. © Liliana Motta. Photo : © Aurelien Mole/Ciap Vassivière

SUCRE ET POLITIQUE, DE LA CANNE À LA BETTERAVE

Par Marcel Dorigny, professeur honoraire de l'université Paris 8

Produit phare du monde colonial esclavagiste, le sucre devient incontournable au XVIII^e siècle, quand son mode de production est remis en question pour des raisons morales et économiques.

■ LA CANNE À SUCRE est l'une des plantes les plus emblématiques de la première colonisation européenne de l'époque moderne : c'est en effet la production par excellence de ces « nouveaux mondes » conquis par les Européens à partir de la fin du xv^e siècle. Ainsi les Antilles, cœur de ce monde colonial, sont-elles longtemps appelées, à juste titre, « les îles à sucre ».

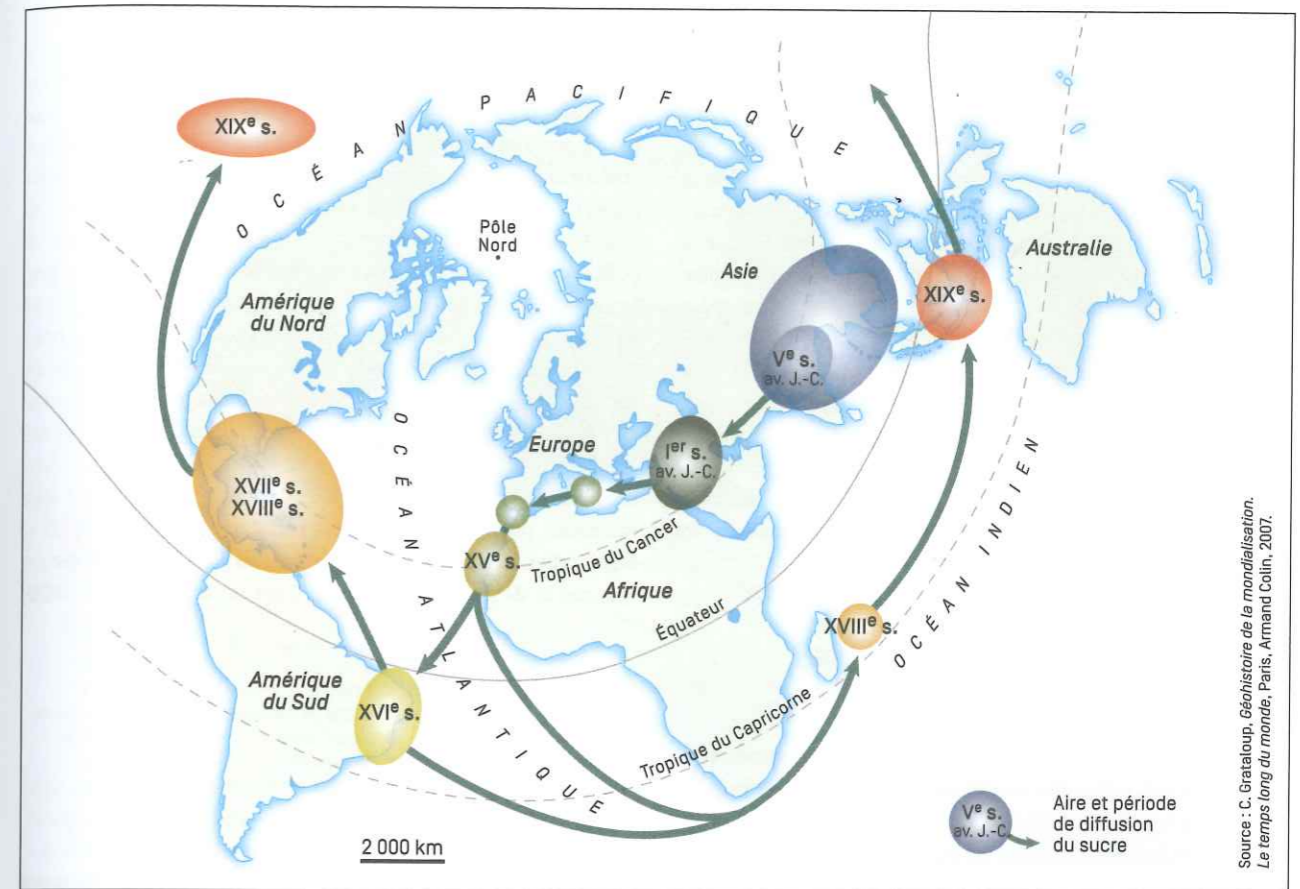
La canne à sucre arrive aux Amériques au terme d'un long cheminement. Originnaire du Sud-Ouest de l'océan Pacifique (Indonésie d'aujourd'hui), elle migre vers l'ouest, d'île en île, pour atteindre Ceylan et l'Inde à la fin du II^e millénaire avant notre ère ; puis elle est implantée à travers le golfe Persique, la mer Rouge et, de là, passe en Méditerranée orientale, notamment à Chypre. Importé en Europe occidentale par les négociants vénitiens dès le x^e siècle, le sucre reste un produit rare et de grand luxe jusqu'aux grands bouleversements géopolitiques inaugurés à la fin du xv^e siècle.

ÎLES À SUCRE, ÎLES AUX ESCLAVES

Dans la seconde moitié du xv^e siècle, l'implantation progressive des Portugais et des Espagnols sur les îles du littoral atlantique de l'Afrique introduit la canne à sucre au-delà du détroit de Gibraltar, pénétrant pour la première fois dans ce vaste océan. Madère, les Canaries, le Cap-Vert, Sao Tomé et Principe développent ainsi rapidement la culture sucrière. Fait remarquable, cette culture insulaire est immédiatement assurée par une main-d'œuvre servile importée du proche continent africain. Les Portugais inaugurent ainsi ce qui

devient « l'engrenage négrier » : les plantations des siècles suivants sont massivement cultivées par des esclaves transportés des côtes africaines sur des navires européens vers les colonies des Amériques, d'abord au Brésil puis aux Antilles et progressivement dans l'ensemble des zones tropicales du « Nouveau Monde », territoires acquis par les puissances européennes entre le xvi^e et le xvii^e siècle.

La canne à sucre traverse l'Atlantique presque en même temps que les colonisateurs des principales puissances maritimes de l'Europe occidentale. Ce « grand bond » par-dessus l'Atlantique est à l'origine d'une mutation quantitative massive de la plantation sucrière. La culture de la canne se généralise à la fin du xvii^e siècle et, partout, elle s'accompagne de l'essor de la traite négrière et de la population servile des colonies. Le point extrême de ce vertigineux engrenage est atteint dans la partie française de l'île de Saint-Domingue à la fin du xviii^e siècle : plus de 85 % de la population y est esclave, la traite atlantique achemine sur l'île 35 000 à 40 000 nouveaux captifs chaque année, soit près de la moitié du trafic transatlantique annuel total. Cette « importation » massive est nécessaire pour répondre à une demande croissante de sucre en Europe – longtemps réservé à une élite sociale fortunée, il devient en effet en quelques décennies un produit consommé par de larges couches des populations urbaines du Vieux Continent – et pour combler les effets de la mortalité très importante qui frappe les esclaves affectés au travail de la canne et de sa transformation. La colonie de Saint-Domingue est alors le premier producteur mondial de sucre et représente la plus forte concentration d'esclaves des Amériques.



Source : C. Grataloup, Géohistoire de la mondialisation. Le temps long du monde, Paris, Armand Colin, 2007.

Certes, la culture de la canne à sucre n'est pas la seule à utiliser une main-d'œuvre exclusivement servile, les plantations de café, d'indigo, de cacao et plus tard de coton sont elles aussi mises en valeur par des esclaves, mais la plantation sucrière est celle qui exige les travaux les plus durs, très consommateurs d'une main-d'œuvre pourtant réputée robuste et adaptée aux conditions climatiques tropicales. Aucune des autres cultures coloniales ne « consomme » autant d'esclaves. Un lien structurel s'établit donc rapidement entre généralisation de l'industrie sucrière et esclavage de masse. Car la seule culture de la canne ne représente qu'un maillon de ce « complexe sucrier » : le transport des cannes coupées, le broyage par des moulins souvent tournés par des esclaves, la longue phase de chauffe dans les chaudières, puis le raffinage de la mélasse et sa mise en fûts sont aussi des opérations complexes et surtout éprouvantes pour les esclaves, dans une chaleur terrible, où les accidents sont fréquents et entraînent de nombreuses mutilations.

Le philosophe Claude Adrien Helvétius, contemporain de Denis Diderot, souligne magistralement ce lien entre le sucre, devenu de consommation courante en Europe, et la généralisation de l'esclavage dans les colonies tropicales : « Si l'on suppose le nombre d'hommes qui périt, tant par les guerres que dans la traversée [...], qu'on y ajoute celui des nègres [...], victimes] des caprices, de la cupidité et du

La propagation du sucre depuis le v^e siècle avant notre ère. Venu d'Extrême-Orient, la culture de la canne à sucre n'est implantée en Amérique qu'au xvi^e siècle par les premiers colons portugais au Brésil. Source : Marcel Dorigny, Atlas des premières colonisations, Autrement, Paris, 2013, p. 60-61, cartographie Fabrice Le Goff.

pouvoir arbitraire d'un maître ; [...] celui des citoyens qui périssent par le feu, le naufrage ou le scorbut [...], celui des matelots qui meurent pendant leur séjour à Saint-Domingue [...] : on conviendra qu'il n'arrive point de barrière de sucre en Europe qui ne soit teintée de sang humain. » (De l'Esprit, 1758, chapitre III, note 10). Le lien entre esclavage et canne à sucre est tel qu'il devient le plus efficace des arguments justifiant la pratique, jugée inévitable, de l'esclavage et de la traite : sans ces deux « moteurs », vous n'aurez plus de sucre, affirment planteurs et armateurs face aux « philanthropes » qui dénoncent le système esclavagiste, mais qui, dans le confort de leurs salons, consomment café et sucre en abondance.

L'insurrection des esclaves de Saint-Domingue, en août 1791, provoque presque immédiatement la première « crise du sucre » : dès janvier 1792, la production s'effondre et le sucre n'arrive plus en Europe. À Paris des émeutes populaires éclatent alors, dénonçant cette pénurie. De plus, la guerre – notamment sur mer – entre la France et

l'Angleterre, quasi continue de 1793 à 1815, perturbe le ravitaillement du continent européen en produits coloniaux. La menace de pénurie semble se confirmer, malgré le retour de la paix générale, avec l'abolition de la traite d'abord (1815 au plan international) et de l'esclavage ensuite (1833 pour l'Angleterre, 1848 pour la France). Cependant, le risque d'un manque de main-d'œuvre est rapidement conjuré : le recours massif à des « engagés » (d'abord des Africains, puis des Indiens) assure la pérennité de la culture sucrière. Ceux-ci sont acheminés vers les « îles à sucre » aussi longtemps que la demande de ce précieux produit est soutenue. L'exemple de la Guadeloupe illustre ce lien direct : la courbe de l'arrivée des engagés suit celle de la production sucrière ; quand cette dernière commence à décliner, face à la concurrence des autres sucres, l'afflux des engagés cesse.

Mais malgré cette « solution de remplacement », un tournant est déjà amorcé dans la logique sucrière, jusqu'alors exclusivement dépendante des colonies tropicales.

À LA RECHERCHE D'UNE ALTERNATIVE AU SUCRE DE CANNE

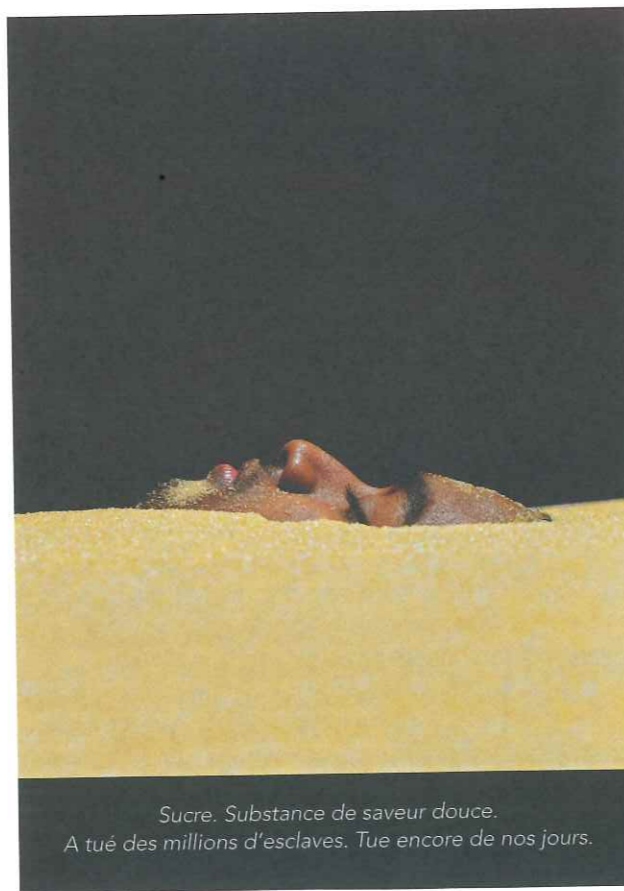
Dès la seconde moitié du XVIII^e siècle, des recherches sont faites pour répondre à l'accusation de plus en plus virulente dénonçant un sucre imprégné du sang des esclaves. Quelles plantes pourraient produire cette substance tant convoitée, sous un autre climat et sans esclavage ? L'*Encyclopédie* de Diderot et d'Alembert, à l'article « sucre » du chevalier Louis de Jaucourt (tome XV, 1765), ouvre le débat en passant en revue une longue liste de plantes susceptibles de remplacer la trop critiquée canne à sucre : entre autres le sirop d'érable, la sève du bouleau (le *birch sugar* des Anglais), le « blé de Turquie » (c'est-à-dire le maïs), le sirop de frêne, le panais et, *in fine*, la betterave. La recherche sera pourtant longue avant de trouver la plante magique qui pourvoirait l'Europe d'un produit qu'elle ne peut plus ôter de son style de vie, tout en en transportant la production sur les terres européennes, où elle serait assurée par une main-d'œuvre libre.

De nouveau, c'est la conjoncture militaire qui lance l'innovation majeure dans l'économie sucrière : la guerre totale entre l'Europe continentale napoléonienne et l'Angleterre maîtresse des mers se traduit par le « blocus continental », qui interdit toute importation sur le continent. Ce blocus ajoute ses effets à la crise sucrière déjà violente découlant de la révolte des esclaves et de l'abolition française de l'esclavage (décret du 4 février 1794) qui en résulte. À partir de la reprise de la guerre franco-anglaise fin 1803, la pénurie de sucre est totale en Europe. Ce contexte éminemment contraignant accélère la recherche d'une nouvelle plante sucrière.

Connue de longue date (Olivier de Serres, sous Henri IV, en avait signalé les propriétés sucrières), l'utilisation de la betterave en est alors encore au stade expérimental, l'extraction de son sucre n'ayant pu atteindre un niveau susceptible de remplacer les énormes productions de la

canne. La première tentative industrielle d'extraction du sucre de betterave est tentée en 1802, en Silésie (région au sud-ouest de la Pologne, à la frontière de l'Allemagne et de la République tchèque) : 70 kg de betterave sont traités par jour, pour produire 2 kg de sucre. Le stade artisanal n'est pas encore dépassé. La rupture intervient après 1806, au moment où le blocus naval interdit toute introduction de sucre des îles. Pour contrer cet embargo total, Napoléon mène une politique volontariste en faveur de la betterave, appuyée par le chimiste et industriel Jean-Antoine Chaptal, qui est aussi son ministre de l'Industrie. Sous l'égide de l'État, l'industriel Benjamin Delessert lance la première sucrerie industrielle en 1812. Désormais, le processus est engagé et ne fait que se perfectionner dans les décennies suivantes. Le retour de la paix en 1815 n'interrompt pas cet élan betteravier, l'abolition de la traite puis celles de l'esclavage constituant des menaces potentielles sur le devenir du « sucre colonial », auxquelles s'ajoute la dénonciation de plus en plus forte de son mode de production. Ainsi, dans les années 1840-1850,

Extrait de l'exposition itinérante « Fermerons-nous encore les yeux ? Des affiches contre l'esclavage », ville de Saint-Denis et lycée Paul-Éluard, « Ateliers d'histoire » animés par Sylvie Zamia, photographies de Philippe Monges (avec le soutien du ministère des Outre-mer, de la Délégation interministérielle pour l'égalité des chances des Français en Outre-mer, du CGET et de la société 2PGB).



Sucre. Substance de saveur douce.
A tué des millions d'esclaves. Tue encore de nos jours.



une véritable « guerre des sucres » oppose, à travers d'intenses campagnes de presse, le « sucre français », travaillé par des « mains françaises », au sucre colonial « baigné du sang des esclaves ».

Au cours du XIX^e siècle, la culture de la betterave ne fait que croître à mesure que la consommation de sucre se répand, faisant reculer celle de la canne. En France, au milieu du siècle, le sucre blanc de betterave, auquel les masses populaires se sont converties, dépasse celui de canne, de plus en plus réservé à l'élite sociale. Le lobby des betteraviers (cultivateurs de la plante et industriels propriétaires de raffineries de plus en plus performantes) supprime alors celui des colons producteurs de canne et la prospérité des régions betteravières leur donne un poids énorme dans les batailles politiques de la III^e République. En effet, le monde rural est alors puissant, assurant les élections aussi bien locales que nationales ; le groupe de pression des betteraviers est à la fois agricole (les cultivateurs) et industriel (les sucreries et les réseaux de distribution), ce qui explique son importance politique dans une France encore massivement rurale.

UN RETOUR EN GRÂCE DE LA CANNE À SUCRE

Le retour, jamais majoritaire, du sucre de canne s'opère tardivement, dans les années 1980-2000. Pourtant, un retournement de la conjoncture sucrière s'amorce depuis les années 2010. D'une part, de nouveaux producteurs de canne à sucre se sont imposés sur le marché mondial, notamment l'Inde et l'Indonésie, qui imposent une baisse rapide des prix grâce à leurs coûts de production très bas ; d'autre part, en

Anonymous, *Enterrement du sucre indigène*, 1839, lithographie, 26,50 x 36,20 cm, Paris, Musée Carnavalet, Histoire de Paris. Dans la guerre commerciale que se livrent le sucre « indigène » de betterave, cultivé sur le sol français, et le sucre de canne des colonies, le premier n'est d'abord pas assez rentable. Toutefois, loin d'être enterré, il triomphera sous la III^e République, le lobby des betteraviers, bien implanté dans les campagnes françaises se révélant plus fort que celui des planteurs.

Europe la consommation de sucre est en recul, en particulier sous l'effet de la publication de statistiques alarmantes mettant en évidence les dangers de ce produit (obésité et généralisation des diabètes, notamment dans les classes populaires) et des campagnes d'information des consommateurs. À ces deux causes s'ajoute la modification de la politique agricole européenne, qui renonce à soutenir les prix du sucre, abandonné aux lois du marché. Ainsi, la production betteravière est-elle en recul rapide en Europe, notamment en France, premier producteur mondial : entre le début des années 1980 et aujourd'hui, la surface agricole consacrée à la betterave est passée de plus de 600 000 à 370 000 hectares. Une nouvelle étape est ainsi en gestation dans la longue histoire du sucre. ■■

SAVOIR +

Dockès Pierre, *Le Sucre et les larmes : bref essai d'histoire et de mondialisation*, Descartes & C^o, Paris, 2009.
Tulet Jean-Christian, « La fin de l'empire du sucre dans les îles de la Caraïbe », *Caravelle*, n° 109, 2017, p. 15-29.
Schnakenbourg Christian, *Histoire de l'industrie sucrière en Picardie (1810-2006)*, L'Harmattan, Paris, 2010.

HENRY DAVID THOREAU ET LE « NATURE WRITING »

François Specq,
professeur de littérature
des États-Unis à l'École
normale supérieure de Lyon

La crise écologique actuelle a mis en vue une tradition littéraire, le *nature writing*, qui fait de l'observation et de la protection de la nature son objet premier.

■ **SOUVENT CONSIDÉRÉ** comme propre aux États-Unis, au point que le terme n'est généralement pas traduit, la *nature writing* s'enracine dans un contexte plus large et peut être repéré dans d'autres littératures. Si la prudence s'impose en matière de traditions littéraires supposément nationales, il n'en reste pas moins que l'écrivain américain Henry David Thoreau constitue une figure de proue de ce genre ou mode littéraire. Au sens strict, Thoreau n'a pas écrit de *nature writing* : il a simplement écrit ce qu'il a écrit, et ce sont les critiques et éditeurs ultérieurs qui ont établi cette tradition et fait de lui une figure tutélaire. En effet, il a, à travers son œuvre, constitué les grandes caractéristiques de ce genre foisonnant, qu'on ne peut prétendre cartographier ici. Ces grands principes sont fondamentalement au nombre de

trois, correspondant respectivement à l'ordre de la description, du récit et du discours : l'articulation entre science et littérature ; un schéma narratif reposant sur une mise en retrait de l'individu par rapport à la société ; et, enfin, le développement d'une conscience environnementale prônant la protection de la nature. Il n'y a *nature writing* que si ces trois éléments sont, selon des modalités diverses, réunis.

SCIENCE ET DESCRIPTION NATURALISTE

En effet, il paraît évident que la littérature a toujours, sous des formes et à des degrés divers, « parlé de la nature » – et c'est d'ailleurs sur ce constat que s'appuie le vaste courant critique connu aujourd'hui sous le nom d'écocritique, qui s'emploie à étudier les liens complexes entre productions culturelles et environnement. Mais ce qui distingue en premier lieu le *nature writing*, c'est qu'il fait du monde naturel son propos spécifique. Qu'il s'agisse de Thoreau, de Mary Austin, d'Edward Abbey ou d'Annie Dillard, le *nature writing* suppose une attention délibérée et exigeante à l'observation de la nature. Et celle-ci n'est vraiment possible qu'à un observateur informé et entraîné – ayant acquis quelques compétences en botanique ou en ornithologie par exemple. En ce sens, le *nature writing* est un héritier direct



La statue de Henry David Thoreau devant une reproduction de sa cabane dans la réserve de Walden Pond à Concord (Massachusetts), 20 janvier 2016.



Frederic Edwin Church, *Mt. Katahdin*, 1853, huile sur toile, 0,92 x 1,40 m, New Haven (Connecticut), Yale University Art Gallery. Thoreau décrit, dans son récit « Katahdin » (*Les Forêts du Maine*, 1864), son ascension du mont Katahdin (« la plus grande montagne » pour les Indiens Penobscot, qui culmine à environ 1600 m). Si Church présente un paysage pastoral, Thoreau souligne le caractère « infiniment sauvage et désolé » de la montagne et, dans un second récit, « Chesuncook », proposera de protéger la nature sauvage du Maine en créant un parc national.

de l'histoire naturelle, et il n'est pas fortuit qu'il se soit développé à une époque, le XIX^e siècle, où pratiques en amateur et professionnelle de la science n'étaient pas encore aussi scindées qu'elles le sont aujourd'hui.

Produit du développement scientifique qu'a connu l'époque des Lumières, avec la formalisation et la diffusion des savoirs via la publication de flores et manuels d'identification, le *nature writing* ne naît qu'à partir du moment où le langage des sciences vient non pas remplacer mais compléter les codes esthétiques du beau, du sublime et du pittoresque, objets d'une vaste littérature entre le début du XVIII^e et celui du XIX^e siècle. C'est là un trait définitoire assez sûr : un texte qui ne relèverait que de la description pittoresque ou, à l'autre extrémité du spectre, que de la description scientifique ne peut vraiment prétendre à figurer parmi le corpus du *nature writing*. Il faut pour cela qu'observation

et imagination soient mêlées. Selon le dosage des deux, les textes de *nature writing* se situent sur un continuum s'étendant du rationaliste au mystique. Il s'agit d'ailleurs d'une tension qui traverse souvent l'œuvre d'un même auteur, selon le moment de sa carrière mais aussi parfois au sein d'un même livre. L'œuvre de Thoreau apparaît comme l'archétype de cette tension.

En effet, que l'on considère son œuvre la plus connue, *Walden* (1854), ou son vaste *Journal*, tenu sur une période de vingt-cinq ans (1837-1861), Thoreau se tient sur un fil étroit entre le scientifique et le philosophique ou le spirituel. Très au fait des connaissances naturalistes, en lien avec certains des plus importants scientifiques de son temps, et grand utilisateur de flores et autres manuels, il prête une attention minutieuse au monde physique, animé de cette intuition décisive que l'on ne peut voir que ce que l'on connaît. Ainsi soulignait-il qu'on ne verra pas de la même manière le monde qui nous entoure si l'on sait distinguer deux espèces de plantes ou de poissons, puisque le monde, dès lors, cesse d'être une masse plus ou moins uniforme, pour s'enrichir d'une infinité de nuances. En ce sens, la connaissance scientifique vient soutenir l'approche esthétique, en lui donnant davantage de consistance et de précision. Pour autant, Thoreau appelle à ne pas substituer ce que l'on connaît à ce que l'on voit : l'idéal est d'assimiler la connaissance de manière à ce que

celle-ci nourrisse la perception sans jamais la réduire ou lui faire obstacle. Partout, de Thoreau à Annie Dillard en passant par John Muir et Mary Austin, court cette articulation entre le scientifique, l'esthétique et le philosophique, mais c'est bien la composante scientifique qui donne à *nature writing* – au moins de langue anglaise – sa spécificité.

DIRE LA NATURE, DIRE L'EXPÉRIENCE

Le second trait caractéristique du *nature writing* tient au schéma narratif fondamental que constitue la mise en retrait de l'observateur par rapport à la société. Ici encore, Thoreau apparaît comme l'archétype : Walden raconte le séjour de deux ans qu'il fit seul dans les bois bordant le lac de Walden, à une trentaine de kilomètres à l'ouest de Boston. Il s'agissait pour lui d'une « expérimentation » visant à « se confronter uniquement aux faits essentiels de la vie » (Walden, trad. de l'auteur). Le *nature writing* se conçoit toujours comme le récit d'une expérience, généralement solitaire, faite par l'auteur : le lien indissociable entre vivre, observer et écrire fait qu'on ne saurait imaginer de *nature writing* à la troisième personne. Que ce soit Thoreau dans la campagne boisée du Massachusetts ou bien Annie Dillard dans celle des Appalaches (*Pèlerinage à Tinker Creek*, 1974), Mary Austin (*Le Pays des petites pluies*, 1903) ou Edward Abbey (*Désert solitaire*, 1968) dans les déserts du Sud-Ouest des États-Unis, ou bien John Muir dans les forêts sauvages de Californie (*Les Montagnes de Californie*, 1894 ; *Un été dans la Sierra*, 1911), le *nature writing* suppose ce retrait, cette distance permettant de donner un caractère intense et unique à l'expérience que l'homme fait de la nature. C'est en cela que cette tradition littéraire est le plus souvent liée à un lieu qu'elle magnifie, et parfois rattachée à une forme de régionalisme que la critique appelle « biorégionalisme » : ainsi des régions côtières du Maine dans *Le Pays des sapins pointus* (1896) de Sarah Orne Jewett. Ce lien étroit à un lieu s'oppose à un rapport à l'espace plus abstrait, plus inféodé aussi à un projet de conquête et de domination de la nature par l'homme.

Si les œuvres de *nature writing* mettent le monde économique, social et politique entre parenthèses, c'est que l'auteur cherche à cultiver un détachement vis-à-vis des considérations matérielles qui caractérisent le rapport ordinaire de l'homme à la nature, et, ce faisant, à créer les conditions d'un engagement personnel à caractère éthique, esthétique et philosophique. Il ne s'agit pas de misanthropie conduisant à tourner le dos à la société, mais d'une suspension temporaire, et comme méthodologique, des prérogatives ordinaires de l'humain. L'objectif fondamental est de se perdre de vue dans ce que l'on voit, afin, selon les termes de Thoreau, de retrouver « l'étendue infinie de nos relations » (Walden, trad. de l'auteur). Car c'est bien là l'enjeu : élargir et complexifier ce que notre mode d'existence habituel réduit et simplifie, parce qu'il nous contraint sans cesse à agir, et ainsi, littéralement, à trancher dans le vif. Suspendre l'agir

ouvre de nouveaux horizons, et ceux-ci seront d'autant plus vastes qu'on saura les enrichir : interroger ses perceptions, creuser leur épistémologie, est un vecteur essentiel de cette conscience renouvelée du monde (*consciousness*). L'idée est en effet que la conscience du monde – qu'on la juge poétique, scientifique ou spirituelle – est une disposition à cultiver, à rebours des contraintes de la vie économique et sociale. Cette disposition est en chaque individu et ne demande qu'à être développée : c'est le credo fondamentalement démocratique des adeptes du *nature writing*. En ce sens, ces auteurs se voient comme un exemple, et c'est cette tension entre retrait individualiste et relation d'exemplarité qui donne toute sa force aux textes de cette tradition : « voyez, cela aussi vous pouvez le voir, l'apprécier, ce n'est pas compliqué, c'est une affaire de disponibilité et d'attention », semblent nous dire tous ces auteurs. C'est en écrivant qu'on apprend à voir et qu'on enseigne aux autres comment regarder.

Le *nature writing* se fonde donc sur un rapport paradoxal à l'humanité : tout entier tourné vers le spectacle infini de la nature, et tâchant de minimiser le rôle de la société et de la culture dans la perception, le *nature writing* n'en entend pas moins s'adresser aux autres hommes et leur dévoiler la dimension à la fois singulière et universelle du rapport de l'homme au monde, formant ce qu'Aldo Leopold appelait une « communauté biotique » (*Almanach du comté des sables*, 1949). Le *nature writing*, en tant que récit personnel d'expérience de la nature, se veut donc autant outil d'éducation des autres hommes que de perception personnelle.

LITTÉRATURE ET CONSCIENCE ÉCOLOGIQUE

C'est dans cette conviction démocratique que s'enracine la troisième caractéristique du *nature writing*, sa vocation à développer et renforcer une approche plus respectueuse de la nature, qu'on désignera comme « conscience écologique », ou – selon une terminologie qui constitue un anglicisme mais permet en français de marquer la différence avec l'écologie au sens politique – « conscience environnementale » (*awareness*). En effet, l'expérience d'effacement de soi qui conditionne le *nature writing* ne vise pas uniquement à éprouver l'étendue infinie de nos liens personnels avec le monde sensible, et donc à enrichir notre existence, mais à retrouver une conscience plus juste des rapports d'interdépendance entre l'humanité et le monde qui la fait vivre. Si le *nature writing* porte son attention sur l'ordinaire, le commun, qu'il nous faut nous réhabituer à voir, il met simultanément en avant qu'il s'agit là de notre bien commun.

En effet, il convient ici de souligner que, en dépit d'une longue tradition dans ce sens, la nature dont il est question ne se restreint pas aux lointaines contrées sauvages : la dynamique profonde du *nature writing* est celle d'une attention au monde qui nous entoure au quotidien. À ce titre, Thoreau constitue là encore un exemple crucial : quoique sa défense du monde sauvage et son appel en faveur de



Une entrée du journal d'Henry David Thoreau présentée lors de l'exposition « This Ever New Self: Thoreau and His Journal » au musée de Concord (Massachusetts), 26 septembre 2017.

la création de parcs nationaux (dans *Les Forêts du Maine*, 1864) aient fait de lui une figure tutélaire du mouvement de préservation de la nature, on ne saurait perdre de vue que l'essentiel de ses écrits consiste en une observation attentive, minutieuse et passionnée des infinies formes du vivant dans les environs de sa petite ville de Concord au Massachusetts. Et c'est bien cette réappropriation – intellectuelle, physique, esthétique – de notre environnement immédiat qui importe : apprendre à voir ce que l'on ne voit plus, car cela est sacrifié à la fausse évidence des exigences du quotidien.

C'est pourquoi aussi le *nature writing* ne se limite pas à la célébration exaltée des beautés de la nature, mais fait aussi place à l'évocation des multiples formes de dégradation environnementale, depuis *Les Forêts du Maine* de Thoreau jusqu'au long poème *Garbage* (1993) d'Archie R. Ammons en passant par *Printemps silencieux* (1962) de Rachel Carson, puissante évocation d'une nature muette en raison de la disparition des insectes et des oiseaux tués par le DDT (insecticide agricole le plus utilisé jusque dans les années 1970).

Le *nature writing* est parfois accusé de naïveté (de « romantisme ») par ses détracteurs – que ceux-ci affichent

un rejet de toute perspective écologique, ou bien dédaignent toute forme de littérature jugée prisonnière de l'idée éculée de *mimesis*. Mais, dans son essence, et quelles que soient ses variations à travers le temps, le *nature writing* offre en réalité une complexe interrogation d'ordre anthropologique. Loin de porter son attention sur ce qui ne serait pas humain – la nature entendue dans un sens simpliste – le *nature writing* entend contribuer à transformer les liens qui nous lient à ce « monde plus qu'humain » (David Abram) sans lequel l'humanité ne serait rien. ■■

SAVOIR +

Le vaste corpus de *nature writing* a été partiellement traduit en français, principalement chez Gallmeister, Le Mot et le Reste, José Corti.

Buell Lawrence, *The Environmental Imagination: Thoreau, Nature Writing, and the Formation of American Culture*, Harvard University Press, Cambridge (MA), 1995.

Garrard Greg [dir.], *The Oxford Handbook of Ecocriticism*, Oxford University Press, Oxford, 2014.

Specq François, « Habiter la frontière : l'humanisme sauvage d'Henry David Thoreau », postface aux *Forêts du Maine* de Henry David Thoreau, Éditions Rue d'Ulm, Paris, 2004, p. 365-522.

Specq François, « Se perdre de vue dans ce que l'on voit : le Journal de Thoreau et l'écriture de la nature », *Revue française d'études américaines*, n° 106, 2005, p. 8-18.

DÉFENSE ET ILLUSTRATION DE L'ENVIRONNEMENT

Chaque rentrée littéraire voit grandir la place de la littérature environnementale. L'écopoétique, soucieuse d'écriture, accompagne ce mouvement de prise de conscience écologique.

Par Pierre Schoentjes,
professeur
de l'université de Gand

■ LES ENJEUX ENVIRONNEMENTAUX se sont imposés au premier plan de la réflexion contemporaine et l'écologie constitue aujourd'hui en Europe le plus grand idéal fédérateur. La prise de conscience dans ce domaine s'est amorcée progressivement au lendemain de la Seconde Guerre mondiale, avant de connaître une accélération dans les années quatre-vingt.

ÉMERGENCE D'UN CORPUS

Notre regard sur la nature a en effet profondément changé dans la seconde moitié du xx^e siècle, qui a vu la fin de la société rurale comme de la littérature régionaliste qui l'avait accompagnée avant d'être discréditée stylistiquement autant qu'idéologiquement. « L'environnement », terme connoté positivement et qui renvoie dans l'usage quotidien à un univers naturel éloigné de la ville, est venu remplacer ce qui avait un jour été la « campagne », un lieu bien circonscrit dont le paysan tirait sa subsistance.

Dans le même temps, le réchauffement climatique, la transformation des paysages, l'épuisement des ressources naturelles, la pollution induite par notre consumérisme, la menace de disparition pesant sur de nombreuses espèces ont amené les écrivains à intégrer ces questionnements et à considérer sous un autre angle la nature et nos manières d'habiter le monde. Romain Gary (*Les Racines du ciel*, 1957) d'abord, Pierre Gascar (*Le Présage*, 1972) et Jean-Marie Gustave Le Clézio (*Les Géants*, 1973) ensuite, apparaissent comme des précurseurs. Aujourd'hui, un nombre grandissant d'écrivains font résonner la problématique et une toute nouvelle génération s'empare d'un domaine resté longtemps périphérique dans le monde des lettres.

La littérature française a peut-être été moins rapide que d'autres à intégrer dans son champ d'intérêt les mutations de l'environnement et les dangers qui menacent aujourd'hui le monde naturel. Il existe pourtant un corpus considérable mais qui, jusqu'à une date récente, n'était pas visible comme tel, les approches universitaires privilégiant traditionnellement d'autres regroupements.



Titus Simoens, *Montagne de gypse, Zelzate, Belgique, 2012*. Contrairement aux apparences, cette photo ne montre pas des montagnes enneigées, mais une décharge de gypse phosphore, un produit hautement toxique. La montagne, haute de 50 m, s'étend sur l'équivalent de 120 terrains de football, à 15 km du centre-ville de Gand. Au moment de la photo, le terrain, racheté par quatre grandes entreprises de dragage doit être décontaminé, reboisé et transformé en parc solaire photovoltaïque. Le cadrage artistique de la photo vise à interpeller, à faire prendre conscience des enjeux écologiques par le prisme d'un choc esthétique, ce qui est tout l'enjeu de la « littérature verte ».

Les relations entre l'homme et son environnement jouent un rôle majeur chez des auteurs très différents, mais qui regardent tous la nature pour elle-même, en dehors de toute considération utilitaire ou esthétique. Une curiosité s'exprime pour les environnements les plus divers, de la campagne française aux régions sauvages les plus reculées du monde. Les différents règnes – minéral, animal, végétal – reçoivent leur part d'attention. C'est cependant l'animalité qui a concentré dans un premier moment l'essentiel de l'attention, en notre

époque de montée du végétarisme et d'intérêt pour les droits des animaux. Isabelle Sorente (*180 jours*, 2013) et Jean-Baptiste Del Amo (*Règne animal*, 2016) abordent de manière critique les souffrances animales liées à l'alimentation carnée. Le texte d'enquête cède parfois le pas au roman militant, comme chez l'antispéciste Camille Brunel (*La Guérilla des animaux*, 2018), nourri des thèses de Peter Singer.

Sensibilisés par les films documentaires et les connaissances scientifiques vulgarisées par le net, ces auteurs convoquent à nouveau l'histoire naturelle en littérature. Comparée à la place qu'elle occupe dans le champ aux États-Unis, l'écriture non fictionnelle reste certes restreinte mais elle trouve à s'exprimer, dans le domaine de l'animalité en particulier (Jean Rolin, *Un chien mort après lui*, 2009; Fabienne Raphoz, *Parce que l'oiseau*, 2018).

Stimulés par l'actualité en France de Walden (1858) de Henri David Thoreau et d'Aldo Leopold et la (re)découverte du *Mur invisible* (1963) de Marlen Haushofer, de nombreux récits s'arrêtent à des expériences, réelles ou imaginaires, de solitude dans la nature. Des œuvres comme celles de

Sylvain Tesson (*Dans les forêts de Sibérie*, 2011) ou de Claudie Hunzinger (*La Survivance*, 2013) rappellent à un public urbain qu'il faut peut-être s'éloigner des villes pour éprouver le monde à travers les sens et reprendre conscience de soi.

DE LA LITTÉRATURE VERTE À LA LITTÉRATURE MARRON

Certains des observateurs les plus attentifs de l'environnement naturel se tournent volontiers vers la campagne et font résonner un savoir littéraire et historique. La condition de l'homme tient une place importante dans leurs œuvres ; ainsi chez Hubert Mingarelli, qui pratique l'épuration (*La Dernière Neige*, 2000). Elle est généralement pensée comme une interdépendance, comme l'illustrent les nouvelles de Caroline Lamarche qui s'arrête aux bêtes semi-sauvages (*Nous sommes à la lisière*, 2019).

Jean-Loup Trassard, écrivain majeur du champ, explore volontiers les pratiques du monde rural à travers les gestes (*Dormance*, 2000). Marie-Hélène Lafon (*Joseph*, 2014), dont l'œuvre rejoint le travail du photographe Raymond Depardon, scrute dans une langue exigeante le monde campagnard, comme les migrations de ceux qui quittent l'univers rural pour la ville. André Bucher, quant à lui, écrivain-paysan-bûcheron dont l'univers s'inspirait initialement du *nature writing américain* (*Le Pays qui vient de loin*, 2003), donne au fur et à mesure que son œuvre se développe une place plus grande aux enjeux écologiques.

Les écritures ont en définitive fort peu de points communs, mais chez tous ces auteurs la vision de la nature n'est jamais statique et la fonction qu'ils lui attribuent n'est jamais ni « simplement » décorative, ni « profondément » symbolique. L'intérêt de romans semblables, qui insistent tous sur l'importance de l'expérience sensible du monde concret, consiste à repenser la place de l'homme dans l'environnement naturel.

Alors qu'en France une méfiance s'est longtemps exprimée envers l'environnementalisme, l'on voit maintenant surgir une écriture de l'engagement. Alice Ferney (*Le Règne du vivant*, 2014) a initié le mouvement avec son plaidoyer pour la sauvegarde des océans. Des livres accusatoires se multiplient, comme *La Malchimie* (2019) de Gisèle Bienne qui revient sur le cancer qui a coûté la vie au frère de la narratrice, ouvrier agricole qui avait passé sa vie à utiliser des produits phytosanitaires, comme tant d'agriculteurs à la fois pollueurs des sols et victimes des grands groupes chimiques. La multiplication des fictions qui s'articulent autour d'enjeux environnementaux est si manifeste qu'un Prix du roman de l'écologie (Pré) a été créé en 2018.

Il existe incontestablement une sensibilité à l'écologie chez la génération d'écrivains nés à la fin des années soixante et qui s'exprime avec plus de force encore chez des auteurs plus jeunes. C'est ce qui explique qu'à côté d'une littérature « verte » se développe actuellement une

littérature « marron », qui, plutôt que de regarder du côté des beautés de la nature, se focalise sur les atteintes à l'environnement. *Les Fils conducteurs* (2018) de Guillaume Poix se concentre sur une décharge électronique géante au Ghana, lieu qui permet de problématiser un large spectre d'enjeux : la pollution provoquée par les pays riches, l'exploitation des populations pauvres locales, les violences sexuelles, mais aussi la responsabilité de l'artiste. Cette attention pour la manière dont les problèmes environnementaux sont inextricablement liés à des enjeux plus larges, sociaux en particulier, se retrouve également chez Éric Plamondon, qui prend pour point de départ une révolte consécutive à des problèmes de droits de pêche dans une réserve indienne au Québec (*Taqawan*, 2018). De son côté, Laurent Mauvignier signe avec *Autour du monde* (2014) un livre du monde globalisé, un univers dans lequel la signification des lieux n'appartient plus exclusivement à ceux qui y sont nés. Les lieux abordés par les fictions sont ainsi extrêmement divers : Lafon privilégie le Cantal agricole, Trassard le bocage de Mayenne, Bucher la montagne des Alpes de Haute-Provence. D'autres ancrent leurs histoires dans des environnements plus exotiques : Plamondon retient la Gaspésie (Québec), Mauvignier multiplie des lieux dispersés sur l'ensemble du globe, Ferney choisit l'Atlantique et le Pacifique sud, Poix se focalise sur la banlieue d'Accra (Ghana)... Comme les interrogations environnementales paraissent plus explicites chez les écrivains qui se tournent vers un ailleurs géographique plus éloigné de nous, la tentation pourrait exister d'opposer les romans « du terroir » à ceux « de la Terre ». Mais aucune nostalgie ne s'exprime ici pour un monde naturel tel qu'un Maurice Genevoix pouvait encore le présenter dans les années soixante-dix.

Une fois écartée la paralittérature, il ne s'agit pas de juger mais de comprendre comment fond et forme se répondent dans une œuvre donnée, ou interagissent d'une fiction à une autre. Sans doute a-t-on davantage besoin aujourd'hui d'analyses attentives de la lettre des œuvres que de théories qui énoncent des principes généraux ou limitent le questionnement à des enjeux politiques, philosophiques ou idéologiques.

Observons que certains défenseurs de la « Terre », engagés dans une écologie militante, oublient parfois qu'il est difficile de mettre en scène des lieux proches, comme le sont les campagnes françaises. En littérature comme en politique, la protection des baleines en Antarctique est une cause qui, en France, emporte plus facilement l'adhésion que celle de l'ours dans les Pyrénées, du loup dans le Mercantour ou des taureaux dans les arènes de Nîmes. Pour ne rien dire de l'agrion de Mercure à Sivens, ou du triton crêté à Notre-Dame-des-Landes. Ces ZAD n'ont d'ailleurs pas suscité la créativité des romanciers, même si Pascal Dessaint (*Un homme doit mourir*, 2018) s'en inspire dans un polar, genre qui prend de plus en plus volontiers la ruralité pour cadre (Franck Bouysse, *Glaise*, 2017) et l'écoterrorisme pour sujet (Jean-Christophe Rufin, *Le Parfum d'Adam*, 2007).

ÉCOPOÉTIQUE

Avec la montée d'une conscience environnementale, il n'est plus question aujourd'hui de réduire la nature à un décor statique, à un miroir de la psychologie ou à un espace symbolique. Depuis les années quatre-vingt, le monde universitaire anglo-saxon – curieux de « wilderness » (E.-U.) ou de « country » (G.-B.) – a relayé la montée de l'écologie en confiant à l'écocritique la tâche d'étudier l'interaction entre le littéraire et l'environnement naturel. Des critiques majeurs ont modelé une discipline qui a déjà évolué de manière importante depuis les travaux séminaux. Toutefois, l'inscription de cette discipline au sein des études culturelles, la perspective souvent axiologique des analyses et un rapport à la nature historiquement différent dans les pays anglo-saxons de tradition protestante ont freiné sa diffusion dans les pays du Sud de l'Europe. En France se sont ainsi développées d'autres approches qui tantôt prolongent l'intérêt ancien pour le paysage et la géographie – notamment avec la géopoétique de Kenneth White ou la géocritique de Michel Collot et de Bertrand Westphal – tantôt embrayent sur des sensibilités plus récentes, comme la zoopoétique d'Anne Simon.

Pour marquer les spécificités de l'univers continental, le terme « éco-poétique » s'est imposé. Il a été privilégié en France parce qu'il permet d'aborder le champ concerné en mettant davantage l'accent, à travers l'étymologie de *poiein*, sur le faire littéraire. Le mot partage en outre une racine avec *écologie*, construit sur le grec *oikos* qui désignait une maisonnée englobant tant la demeure et ses terres que les membres de la famille. Il réfère aujourd'hui à une pensée qui prend en considération l'interconnexion de tous les êtres vivants et se montre soucieuse de l'écosystème. Les interactions jouent un rôle essentiel dans l'environnement naturel et leur rôle n'est pas moindre dans les études littéraires. L'éco-poétique, qui met plus en avant le souci de la forme et de l'écriture, n'est donc pas une approche monolithique ; elle dispose aujourd'hui de méthodes propres et a su adapter à son usage les outils traditionnels de la critique, de la stylistique à l'analyse du discours, en passant par l'histoire littéraire qu'elle revisite volontiers pour esquisser un canon alternatif. Élisée Reclus a ainsi reçu une attention qui lui a longtemps fait défaut tandis que Jacques-Henri Bernardin de Saint-Pierre, Jean-Jacques Rousseau ou Jean Giono sont abordés à travers un filtre différent, qui renouvelle la lecture.

Appliquée à cette littérature en train de se faire, l'éco-poétique cherche à cerner comment l'imaginaire contribue à façonner un nouveau rapport à l'environnement, dans un monde où la prise de conscience écologique est devenue centrale. L'éco-poétique fait en outre le choix de s'inscrire dans une perspective cosmopolite. En ce début de XXI^e siècle, aucun lecteur en effet ne se cantonne plus à un espace national unique, pas plus qu'il ne réside toujours au même endroit : la mobilité est devenue une des caractéristiques premières de nos sociétés.



Benjamin Lowy, *Décharge d'Agbogbloshie, Accra (Ghana), décembre 2015*. De jeunes hommes (presque tous les migrants internes de la région nord de Tamale au Ghana) travaillent dans une fumée toxique, en brûlant des pièces manufacturées à base de cuivre dans l'espoir de gagner un revenu modeste pour se nourrir chaque jour, voilà le sujet des *Fils conducteurs* de Guillaume Poix, un exemple de « littérature marron », un type d'écriture qui se focalise sur la dénonciation des atteintes à la nature (et à l'humanité) dans un style percutant.

Curieuse de toutes les littératures qui irriguent les romans d'aujourd'hui, l'éco-poétique met en avant un rapport privilégié au lieu, à travers un lien réinventé à l'espace naturel. À une époque où, après les jeux formels de la littérature autoréférentielle, la tendance a été de considérer prioritairement le passé et d'ériger l'histoire en point de référence systématique, elle fait d'autres choix. L'éco-poétique veut croire en la capacité des récits à structurer l'imaginaire et à agir ainsi sur le monde. Elle entend accompagner une littérature environnementale en pleine expansion et qui participe à penser le futur. ■■

SAVOIR +

Blanc Nathalie, Chartier Denis, Pughe Thomas (dir.), *Écologie et politique*, n° 36, « Littérature et écologie. Vers une éco-poétique », 2008.

Schoentjes Pierre, *Ce qui a lieu : essai d'éco-poétique*, Wildproject, Marseille, 2015.

Schoentjes Pierre, Simon Anne, Romestaing Alain (dir.), *Revue critique de fiction française contemporaine*, n° 11, « Eco-poétiques », 2015. [En ligne] www.revue-critique-de-fiction-francaise-contemporaine.org/rcffc/issue/view/21

Suberchicot Alain, *Littérature et environnement*, Honoré Champion, Paris, 2012.

Westphal Bertrand, *La Géocritique : réel, fiction, espace*, Minuit, Paris, 2007.

White Kenneth, *Le Plateau de l'albatros*, Grasset, Paris, 1994.

Par Marianne Lanavère,
directrice du Centre international
d'art et du paysage - Île de Vassivière
(Nouvelle-Aquitaine)

POUR UN ART DE LA PRÉSENCE

En regard d'un *land art* souvent formaté, la directrice du Centre international d'art du paysage de Vassivière interroge la création artistique dans les espaces naturels et ruraux.

■ LE DÉVELOPPEMENT DES PARCS DE SCULPTURES depuis le début du xx^e siècle en Europe, dont les modèles représentatifs seraient le Yorkshire Sculpture Park au Royaume-Uni (ouvert en 1977) ou le musée Kröller-Müller aux Pays-Bas (parc de sculptures ouvert en 1961), a récemment été complété par l'émergence de parcours d'œuvres et de biennales dans la nature, à la suite de Skulptur Projekte à Münster (Allemagne, une édition tous les 10 ans depuis 1977). Ces initiatives privées et publiques ont eu le mérite d'ouvrir un terrain fécond d'expérimentations sur les possibilités de lier art et « environnement » en offrant un espace, si réduit soit-il, à des œuvres subtiles qui relèvent de l'intervention ou du mode d'emploi, rendant visible le processus plutôt que l'objet fini, le potentiel davantage que le résultat. Issu de cet héritage, l'art aujourd'hui le plus en phase avec la nature, dans un monde dominé par le tout accessible, serait celui d'une présence au sens d'une plus grande implication de la part des commanditaires et du public, tout en assumant le risque de la déception : rarement spectaculaire, cet art s'intègre au lieu jusqu'à parfois disparaître ; rarement immédiat, sa visibilité est variable en fonction des aléas du temps.

CRÉATION DÉTERRITORIALISÉE POUR UNE NATURE ANTHROPISÉE

Même si les destinations artistiques accordent sporadiquement une place à ces « tentatives » vitales pour penser une esthétique, il n'en demeure pas moins critiquable qu'en répondant pour leur majorité à une logique d'aménagement touristique, non seulement elles représentent une domination supplémentaire sur le vivant dans un monde toujours plus anthropisé, mais elles contraignent également l'expérience de l'art – en tant que traduction du sensible – par des configurations spatiales formatées ou conformes aux normes de sécurité du public. Le cadrage de la présence artistique dans ces sites art et nature, festivals de *land art* ou

biennales de paysage, présente l'inconvénient de réduire la problématique de l'art dans la nature à un modèle conventionnel de relations, occultant par là tout un pan d'une création hors norme, plus spontanée et organique.

La valeur de l'art sur les plans du symbolique et de l'imaginaire, rendue déjà difficilement appréciable du fait de la séparation entre création, transmission et réception, du nivellement des pratiques à l'ère de la globalisation et surtout de leur déterritorialisation, devient un spectre d'autant plus lointain que de nouveaux paradigmes ajoutent à la confusion. En France, parallèlement aux lieux dignes d'intérêt lancés par les politiques publiques (Vent des forêts en Meuse, Cairn à Digne-les-Bains, Forêt d'art contemporain dans les Landes de Gascogne, etc.), il faut maintenant composer avec les parcs de sculptures chics tenus par des fondations en position hégémonique et avec les parcours en plein air organisés par les foires d'art. Les fondations se sont professionnalisées au point de relayer les démarches les plus avant-gardistes, occupant le terrain de l'expérimentation et de la recherche jusque-là défendu par les lieux autogérés et les centres d'art. À la logique du développement territorial s'ajoute celle du capitalisme qui se permet le luxe de posséder même les formes inatteignables, tel le protocole d'une performance.

Du côté de la commande artistique elle-même, si les problématiques sur les limites et les abus de la présence d'œuvres d'art dans l'espace public ont, à juste titre, été pointées par des publications critiques notamment de Joëlle Zask (voir Savoir +) et de Jeroen Boomgaard, celles-ci privilégient plutôt la ville comme terrain d'étude. La place de la création dans les espaces ruraux reste peu interrogée voire quasiment absente de l'histoire de l'art. Il nous faut aujourd'hui questionner le peu de considération que les politiques d'aménagement des espaces naturels et ruraux accordent à l'art. Comment permettre que la création artistique ne soit pas instrumentalisée ni ne s'impose de manière surplombante sur les autres composantes du vivant, pour exister en tant que traduction d'un rapport sensible au monde ?



Liliana Motta, *Dehors*, 2017, Bois de sculpture de l'île de Vassivière, collection CNAP.

L'EXEMPLE DU CIAP SUR L'ÎLE DE VASSIVIÈRE

Pour tenter de répondre à ces enjeux, le Centre international d'art et du paysage (CIAP) pour son Bois de sculptures, une collection hétérogène de 60 sculptures créées de 1983 à aujourd'hui sur l'île de Vassivière (Haute-Vienne/Creuse), s'est récemment tourné vers des œuvres éphémères, des propositions ouvertes à réactiver et des interventions écologiquement « passives », limitant volontairement l'accumulation d'objets. En témoignent deux œuvres « à protocole » réalisées à partir de modes d'emploi en 2017 : l'œuvre paysagère *Dehors* de Liliana Motta, théâtre de verdure créé sans ajout ni retrait de matière à partir de l'observation fine d'une hêtraie, et l'installation *Antares Mulde* de Reto Pulfer, temple païen composé de granit et plantes piquantes tourné vers l'étoile éponyme (constellation du Scorpion). Parallèlement a été amorcée une relecture de la collection, pas seulement dans le lieu mais dans le temps, permettant de prendre en compte la durée propre de chaque œuvre en tant qu'objet évolutif, de l'envisager davantage dans son lien étroit avec les cycles de la nature et d'associer la médiation de l'art aux temporalités du jour et de la nuit, de la lune et des saisons.

Dans une transformation comparable à celle opérée par Adam Sutherland à Grizedale arts (Royaume-Uni), les résidences d'artistes et de chercheurs créées en 2012 dans le château de l'île de Vassivière apparaissent comme une possibilité de mieux articuler présence artistique et contexte spécifique : en venant vivre sur place deux à quatre mois pour entreprendre une recherche située, les résidents mettent en mouvement l'institution autant qu'ils questionnent en creux les politiques locales de conservation de

la nature. Plus récemment, conscient du « hors-sol » qui a toujours tiré l'île vers une zone de loisirs, le Centre d'art a étendu ses commandes artistiques non seulement dans les villages alentour à travers les projets transdisciplinaires, collectifs et participatifs *Transhumance* (2017) et *Vassivière Utopia* (2018-2020) mais aussi, en devenant médiateur du programme Nouveaux commanditaires de la Fondation de France, il s'est mis davantage à l'écoute des désirs de la population jusqu'à inverser son rapport à la commande.

Ces initiatives, si elles renouvellent le modèle du parc de sculptures et incitent d'autres modalités d'expérience pour tenter de dépasser la consommation culturelle, ne suffisent pas pour penser un juste positionnement de l'art dans le contexte complexe du plateau de Millevaches. À Vassivière les dilemmes qu'il reste à résoudre sont de taille : comment une institution d'art contemporain peut-elle aujourd'hui accueillir ce qui ne relève a priori pas de l'art, dans l'idée de favoriser davantage les interrelations nécessaires à l'organicité du lieu ? Qu'il s'agisse d'interventions pirates qui s'improvisent au quotidien dans ce lieu public, de *land art* bricolé par des randonneurs ou de sollicitations d'habitants désireux de faire œuvre d'artisanat, de botanique ou d'agriculture sur l'île, quelle place accorder à ces expérimentations qui tissent des liens profonds avec le vivant ? ■■

SAVOIR +

Antille Benoît, « Parcs à sculptures en Valais : vers une critique de l'économie de projet », *Revue de géographie alpine*, n° 105-2, 2017. [En ligne] <http://journals.openedition.org/rga/3660>

Myvillages, *The Rural*, Whitechapel Gallery/MIT Press, Documents of Contemporary Art, Cambridge, 2019

Zask Joëlle, *Outdoor art : la sculpture et ses lieux*, La Découverte, Paris, 2013.

Cap école inclusive

Confiance, apprentissages, partage

reseau-canope.fr/cap-ecole-inclusive

POUR TOUS LES ENSEIGNANTS
DE TOUS LES NIVEAUX
ET DE TOUTES LES DISCIPLINES.

POUR L'ÉCOLE
DE LA CONFIANCE

Des ressources pédagogiques et d'appui à la formation conçues par et pour les enseignants :

- ↳ des ressources simples et directement utilisables en classe ;
- ↳ des pistes d'aménagements pédagogiques ;
- ↳ les coordonnées de personnes ressources de votre département.



RESSOURCES

RESSOURCES GÉNÉRALES SUR LES ÉCOSYSTÈMES, LES AGROSYSTÈMES ET L'AGROÉCOLOGIE

RAPPORTS

Conférence des Nations unies sur la diversité biologique dite « COP 14 », 2018.

[En ligne] www.cop14-egypt.com/fr

Convention des Nations unies sur la diversité biologique, 5 juin 1992.

[En ligne] www.cbd.int/doc/legal/cbd-fr.pdf

GIEC, tous les rapports et travaux.

[En ligne] www.ipcc.ch

GIEC, « Changements climatiques 2014 : rapport de synthèse – contribution des Groupes de travail I, II et III au cinquième rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat », 2014.

[En ligne] www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/SYR_AR5_FINAL_full_fr.pdf

GIEC, « Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate », 2019.

[En ligne] www.ipcc.ch/srocc/download-report et son communiqué de presse en français :

www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/3/2019/09/SROCC_PressRelease_FR.pdf

IPBES, plateforme intergouvernementale sur la biodiversité et les services écosystémiques.

[En ligne] les rapports : www.ipbes.net/assessment-reports et leur résumé à l'intention des décideurs : www.ipbes.net/system/tdf/ipbes_7_10_add_1_fr.pdf?file=1&type=node&id=36019

AUTRES RESSOURCES

Ademe, *La Vie cachée des sols : l'élément essentiel d'une gestion durable et écologique des milieux*, PDF disponible sur la plateforme Étincel, 2010. [En ligne] www.reseau-canope.fr/etincel/ressource/la-vie-cachee-des-sols

Bellon Stéphane, Lamine Claire (dir.), *Transitions vers l'agriculture biologique : pratiques et accompagnements pour des systèmes innovants*, Quae/Educagri, Versailles, 2009.

Caplat Jacques, *L'Agriculture biologique pour nourrir l'humanité*, Actes Sud, Arles, 2012.

Doré Thierry, Bellon Stéphane, *Les Mondes de l'agroécologie*, Quae, Versailles, 2019.

Dossier Julien, *Renaissance écologique : 24 chantiers pour le monde de demain*, Actes Sud, Paris, 2019.

Dufumier Marc, Le Naire Olivier, *L'agroécologie peut nous sauver*, Actes Sud, Arles, 2019.

Martin Francis, *Sous la forêt*, HumenSciences, Paris, 2019.

Selosse Marc-André, *Jamais seul : ces microbes qui construisent les plantes, les animaux et les civilisations*, Actes Sud, Arles, 2017.

Wohleben Peter, *La Vie secrète des arbres*, Les Arènes, Paris 2017. Adaptation cinématographique sous le titre *L'Intelligence des arbres*, documentaire réalisé par Julia Dordel, Guido Tölke et Jan Roeloffs, Jupiter Films, 2017.

Demain, documentaire réalisé par Cyril Dion et Mélanie Laurent, Mars Films, 2015.

RESSOURCES COMPLÉMENTAIRES

PROTECTION DE L'ENVIRONNEMENT ET SERVICES ÉCOSYSTÉMIQUES

Directive 2004/35/CE du Parlement européen et du Conseil sur la responsabilité environnementale en ce qui concerne la prévention et la réparation des dommages environnementaux, *Journal officiel* n° L 143, 30 avril 2004, p. 56-75.

[En ligne] eur-lex.europa.eu/legal-content/FR/TXT/?uri=celex:32004L0035

Annan Koffi, *We the Peoples: A UN for the Twenty-first Century*, Routledge, Londres, 2014.

Langlais Alexandra, « Natural capital: valuation and payments for ecosystems services » in Elisa Morgera, Jona Razzaque (dir.), *EE Encyclopedia of Environmental Law*, vol. « Biodiversity and Nature Protection », Edward Elgar, Cheltenham (Royaume-Uni), 2017, p. 81-94.

BIODIVERSITÉ ET AGRICULTURE

Adler Peter B., Seabloom Eric William et al., « Productivity is a poor predictor of plant species richness », *Science*, n° 333, 2011, p. 1750-1753.

Anten Niels P. R., Vermeulen Peter J., « Tragedies and crops: understanding natural selection to improve cropping systems », *Trends in Ecology & Evolution*, n° 31, 2016, p. 429-439.

Badri Dayakar V., De-la-Peña Clelia et al., « Root secreted metabolites and proteins are involved in the early events of plant-plant recognition prior to competition », *PLoS One*, 2012.

[En ligne] journals.plos.org/plosone/article?id=10.1371/journal.pone.0046640

Barot Sébastien, Allard Vincent et al., « Designing mixtures of varieties for multifunctional agriculture with the help of ecology. A review », *Agronomy for Sustainable Development*, n° 37-13, 2017. [En ligne] link.springer.com/article/10.1007/s13593-017-0418-x

Deguine Jean-Philippe, Gloanec Caroline et al. (dir.), *Protection agroécologique des cultures*, Quae, Versailles, 2016.

Eggermont Hilde, Balian Estelle et al., « Nature-based solutions: new influence for environmental management and research in Europe », *GIAA, Ecological Perspectives for Science and Society*, n° 24, 2015, p. 243-248.

Gaba Sabrina, Allignier Audrey et al., « Ecology for sustainable and multifunctional agriculture », *Sustainable Agriculture Reviews*, n° 28, 2018, p. 1-46.

Hooper David U., Chapin F. Stuart et al., « Effects of biodiversity on ecosystem functioning: a consensus of current knowledge », *Ecological Monographs*, n° 75, 2005, p. 3-35.

Howden Stuart Mark, Soussana Jean-François et al., « Adapting agriculture to climate change », *Proceedings of the National Academy of Sciences*, n° 104, 2007, p. 19691-19696.

Petit Sandrine, Lavigne Claire (dir.), *Paysage, biodiversité fonctionnelle et santé des plantes*, Quae/Educagri, Versailles, 2019.

Schimper Andreas Franz Wilhelm, *Pflanzengeographie auf physiologischer Grundlage*, Fischer, Jena (Allemagne), 1935.

Skamnioti Pari, Gurr Sarah Jane, « Against the grain: safeguarding rice from rice blast disease », *Trends in Biotechnology*, n° 27, 2009, p. 141-150.

Warming Eugenius, *Oecology of Plants: An Introduction to the Study of Plant Communities*, Oxford University Press, Oxford, 1909.

RESSOURCES PÉDAGOGIQUES

Collectif, *Pour une éducation au développement durable et solidaire : guide pédagogique école, collège, lycée, hors temps scolaire*, CRDP Franche-Comté, Besançon, 2012.

Chaire ANCA, *Manger vers le futur*, bande dessinée. [En ligne] mangerverslefutur.org

Chaire ANCA, programme éducatif Food ninja. [En ligne] foodninja.org

Chaire ANCA, vidéos Food ninja sur la plateforme Étincel. [En ligne] www.reseau-canope.fr/etincel/ressource/les-epinards-comment-sont-ils-produits; www.reseau-canope.fr/etincel/ressource/de-la-traite-a-la-production-de-yaourts; www.reseau-canope.fr/etincel/ressource/production-de-riz-en-camargue

EAThink2015, projet pédagogique sur l'agriculture et l'alimentation durable, incluant 14 pays et financé par l'Union européenne.

[En ligne] eathink2015.org

EAThink, « Penser global, manger local : manuel d'éducation à l'alimentation durable à destination des enseignants », guide pédagogique. [En ligne] eathink2015.org/download/EAThink-toolkit-fr.pdf

Regards sur la terre, plateforme numérique faisant suite à la revue du même nom, revue de référence en matière de développement durable.

[En ligne] regardssurlaterre.com

ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET RECHERCHE

Chlorofil, le site de l'enseignement agricole (secondaire et supérieur) : chlorofil.fr

Educagri, le site d'information et de promotion des établissements publics d'enseignement agricole : educagri.fr

LES ÉCOLES PUBLIQUES D'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR AGRICOLE :

– Agrocampus Ouest, Institut national supérieur des sciences agronomiques, agroalimentaires, horticoles et du paysage (Angers-Rennes) : www.agrocampus-ouest.fr

- AgroParisTech, Institut des sciences et industries du vivant et de l'environnement (Paris) : www2.agroparistech.fr
 - AgroSup Dijon, Institut national supérieur des sciences agronomiques, de l'alimentation et de l'environnement (Dijon) : agrosupdijon.fr
 - Bordeaux Sciences Agro, École nationale supérieure des sciences agronomiques (Bordeaux) : www.agro-bordeaux.fr
 - ENSFEA, École nationale supérieure de formation de l'enseignement agricole (Toulouse) : www.ensfea.fr
 - Montpellier Sup Agro, Grande École d'enseignement supérieur agronomique (Montpellier)

LES ÉCOLES PRIVÉES D'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR AGRICOLE :

- École d'ingénieurs de Purpan, Sciences du vivant, agriculture, agroalimentaire (Toulouse) : www.purpan.fr
 - ESA, École supérieure d'agricultures (Angers-Loire) : www.groupe-esa.com
 - ISA Lille, École d'enseignement supérieur en sciences du vivant, agriculture, agroalimentaire, environnement et paysage (Lille) : www.isa-lille.fr
 - Isara, École d'ingénieurs en agronomie, alimentation et environnement (Lyon) : www.isara.fr
 - UniLaSalle, École d'ingénieurs en filières agricoles, agroalimentaires, alimentation et santé, géologie et environnement (Beauvais, Rennes, Rouen) : www.unilasalle.fr

LES INSTITUTS DE RECHERCHE PUBLICS :

- INRA, Institut national de la recherche agronomique : www.inra.fr
 - Cirad, Centre international de recherche agronomique pour le développement (organisme de recherche agronomique et de coopération internationale pour le développement durable des régions tropicales et méditerranéennes) : www.cirad.fr
 - CNRS : Centre national de la recherche scientifique : www.cnrs.fr

Le Ciheam-IAMM, Institut agronomique méditerranéen de Montpellier : www.iamm.ciheam.org

CATALOGUE CANOPE

Dumont Gérard-François, Froment Éric, Vodisek David (dir.), *Populations et territoires : enseigner le développement durable en géographie*, ouvrage 140 p., 2018. Réf. W0005428 www.reseau-canope.fr/notice/populations-et-territoires.html
Merou Didier, Trégoze Lise et al., *Consommer responsable ? L'alimentation*, ouvrage PDF contenant 4 parcours thématiques pour étudier six filières agricoles, locales et internationales, 2 propositions de projets d'établissement, 13 fiches d'activité, 2019. Réf. W0005432 www.reseau-canope.fr/notice/consommer-responsable_19431.html

ENQUÊTES DE SCIENCES

Baldi Eva, Losier Bernard et al., *De l'organique au minéral : la vie du sol*, support en ligne disponible sur abonnement, 2014. Réf. 31000S06 www.reseau-canope.fr/notice/de-lorganique-au-mineral-la-vie-du-sol.html
Maillard Yann, Bouteiller Marie-Christine et al., *L'évolution génère la biodiversité, l'humain l'impacte*, support en ligne disponible sur abonnement, 2015. Réf. 130E4351 www.reseau-canope.fr/notice/enquetes-de-sciences-evolution-genere-la-biodiversite-lhumain-limpacte_7560.html

TDC

« Nourritures », n° 1102, 1^{er} mars 2016
 « La biodiversité ordinaire », n° 1090, 15 février 2015
 « L'avenir des énergies », n° 1076, 15 mai 2014
 « L'eau, enjeu vital », n° 1050, 15 février 2013
 « La biodiversité », n° 1001, 1^{er} octobre 2010
 « Le développement durable », n° 857, juin 2003

AUTRES REVUES

Diversité, n° 191, « L'expérience du territoire #1 : apprendre dans une société durable », janvier-avril 2018
Diversité, n° 193, « L'expérience du territoire #2 : 40 ans de politique de la ville », septembre 2018
Technologie, n° 207, dossier spécial « Développement durable et écoconception », mars-avril 2017

RESSOURCES GRATUITES EN LIGNE

Entrez dans le paysage. www.reseau-canope.fr/entrez-dans-le-paysage
 « Climats et catastrophes », scénario EPI. www.reseau-canope.fr/notice/climats-et-catastrophes.html
 « Les hommes dans le développement durable - Lycée », une sélection d'ouvrages numériques pour enseigner le développement durable au lycée. www.reseau-canope.fr/notice/les-hommes-dans-le-developpement-durable-lycee.html
Human, le projet pédagogique : éducation et développement durable. www.reseau-canope.fr/human-le-projet-pedagogique.html

Directeur de la publication

Jean-Marie Panazol

Rédacteurs en chef

Jean-Thomas Rieux, Blaise Royer

Rédactrice en chef adjointe

Sophie Delhaume

Secrétaire d'édition

Anne-Sophie Carpentier

Référents disciplinaires

François-Xavier Bernard (sciences), Delphine Cuny (SVT), Frédéric Duchesne (histoire-géographie), Catherine Klein (lettres), Sophie Leclercq (arts)

Direction artistique

Samuel Baluret, Gaëlle Huber

Conception graphique et mise en pages

Catherine Chalot

Iconographie

Adeline Riou

Fabrication

Tony Mazurek, Maud Percie-du-Sert

Régie publicitaire

Catherine Rastier
catherine.rastier@reseau-canope.fr

Abonnement

Tél. 03 44 82 43 98
 Fax 03 44 58 44 12
abonnement@reseau-canope.fr

TDC est une publication de Réseau Canopé

Téléport 1, Bât. @ 4, BP 80158

86961 Futuroscope Cedex

Tél. 05 49 49 78 78

tdc@reseau-canope.fr

Imprimerie

Evoluprint - Groupe LexisNexis
 Parc industriel Euronord
 10, rue du Parc
 CS 85001 Bruguères
 31150 Fenouillet cedex



Les textes cités dans TDC le sont à titre documentaire : les opinions qu'ils peuvent exprimer doivent être appréciées de ce point de vue. Tous droits de reproduction, de traduction et d'adaptation réservés pour tous pays.

© Réseau Canopé 2019

Dépôt légal novembre 2019 - ISSN 0395-6601

Crédits photographiques

Page de couverture : © Gaëlle Huber - Réseau Canopé
 Page 6 : © Gilles Boeuf
 Page 7 : © Philippe Echaroux
 Page 8 : (en haut) © Everton Lourenco/Shutterstock, (en bas) © Bertrand Rieger/hemis.fr
 Page 9 : © Alvaro Canovas /ParisMatch/Scoop
 Page 10 : © Vieslnsh/Shutterstock
 Page 11 : © Lannig Stervinou/Le Télégramme

reseau-canope.fr/nouveaux-programmes

NOUVEAUX PROGRAMMES

À DÉCOUVRIR

Notre nouvel espace pour vous accompagner dans la compréhension et la mise en œuvre de la réforme du lycée :

- des informations pratiques sur la réforme ;
- aux nouveaux programmes ;
- des formats innovants : ressource audiovisuelles, numériques...

Retrouvez dès maintenant tous les outils que nous avons conçus pour vous !

reseau-canope.fr/nouveaux-programmes

Lycée
Réseau Canopé, 2019
Accès gratuit



FICHE DE DOCUMENTATION

Agrosystèmes. La nature à notre service ?
TDC, 1^{er} novembre 2019, n° 1124, 72 p.

Domaines : SVT, histoire-géographie, lettres, arts

CDU : 574

Dewey : 577.27

Descripteurs Motbis : agro-écologie ; biodiversité ; écologie humaine ; écosystème ; environnement ; esclavage ; espèce ; biologie ; littérature ; organisme animal ; plante



© Bettmann/Getty Images
Charlie Chaplin lors du Third Liberty Loan Rally, New York, 1917.

NUMÉRO DU 15 DÉCEMBRE 2019

RHÉTORIQUE ORIGINE ET ÉVOLUTION

NUMÉRO SPÉCIAL LITTÉRATURE ET PHILOSOPHIE

BULLETIN D'ABONNEMENT

– En ligne :
reseau-canope.fr

– Courrier :
complétez et retournez le bon de commande ci-contre à :

Réseau Canopé
Agent comptable-
abonnements

Téléport 1
1, avenue
du Futuroscope
CS 80158
86961 Futuroscope
cedex

RÈGLEMENT

FRANCE

Par chèque bancaire à joindre à la commande, établi à l'ordre de l'Agent comptable de Réseau Canopé

Par mandat administratif à l'ordre de l'Agent comptable de Réseau Canopé, DRFI Poitou-Charentes,
IBAN : FR76 1007 1860 0000 0010 0301 068 - BIC : TRPUFRP1
Nom de l'organisme payeur : _____

ÉTRANGER

Par chèque à l'ordre de l'Agent comptable de Réseau Canopé

Par virement :
IBAN : FR76 1007 1860 0000 0010 0301 068 - BIC : TRPUFRP1
Relations abonnés : 03 44 62 43 98 - télécopie : 03 44 58 44 12
abonnement@reseau-canope.fr

Cachet du payeur obligatoire : _____
Signature : _____

Date _____

Commande à titre personnel

Commande au nom de l'établissement

Code RNE obligatoire : _____

ADRESSE DE LIVRAISON

Nom _____

Prénom _____

Établissement _____

Adresse _____

Ville _____

Code postal _____ Pays _____

Email (obligatoire) _____

Pour recevoir les actualités de votre Atelier Canopé et des sélections de ressources personnalisées, rendez-vous sur reseau-canope.fr/newsletter

ADRESSE DE FACTURATION

Nom _____

Prénom _____

Établissement _____

Adresse _____

Ville _____

Code postal _____ Pays _____

COMMANDE

TDC	Référence	France et outre-mer	Étranger	Quantité	Total
Abonnement 1 an (6 numéros)		50 €	86 €		
Le numéro PDF	W0017372	5,90 €	5,90 €		
TOTAL À PAYER (tarifs susceptibles de modification)					€
Le numéro papier	W0017371	9,90 €	9,90 €		
Frais d'envoi 5,90 € / Union européenne 12 € / DOM-TOM 5,90 € / Étranger ¹ 17 € (tarifs susceptibles de modification)					€
TOTAL À PAYER (tarifs susceptibles de modification)					€

1. Les frais ne comprennent pas les droits de douane, les taxes et redevances éventuels, qui sont à la charge du destinataire à réception de son colis.

ABONNEMENT ATELIER CANOPÉ

Découvrez tous les avantages de l'abonnement

**Valable 1 an dans les 100 Ateliers
Canopé de France, choisissez
la formule qui vous correspond.**

Vous êtes enseignant ?

Abonnez-vous pour seulement 20 €/an !

– Conseil : n'hésitez pas à parler de l'abonnement à votre établissement.

Vous êtes un établissement ?

Abonnez l'ensemble de votre personnel pour 10 €/enseignant.

– Plafonnement à 250 € par établissement et 350 € pour les cités scolaires.
– Valable pour l'ensemble des personnels (enseignants et non-enseignants).

Vous êtes étudiant MEEF 1 et 2

ou demandeur d'emploi ?

L'abonnement est **GRATUIT** pour vous !

– Munissez-vous d'un justificatif pour le présenter à votre Atelier.

Avec l'abonnement Atelier Canopé, profitez d'un ensemble de services et d'avantages :

Développez vos compétences dans l'usage de vos pratiques pédagogiques, l'anglais, la bureautique avec les outils d'autoformation, Mycow et Vodéclic.

Empruntez un ensemble de ressources physiques et numériques.

Bénéficiez de remises sur les ressources éditoriales physiques de Réseau Canopé vendues en Atelier.



Rendez-vous dans
votre Atelier Canopé préféré
et demandez conseil à votre médiateur !

CANOPÉ
LE RÉSEAU DE CRÉATION
ET D'ACCOMPAGNEMENT PÉDAGOGIQUES