

DÉFENDRE LES SOLS POUR NOURRIR LE MONDE

[Christian Valentin](#)

in Sébastien Abis et al., Le Déméter 2021

IRIS éditions | « Hors collection »

2021 | pages 115 à 138

ISBN 0011662117

Article disponible en ligne à l'adresse :

<https://www.cairn.info/le-demeter---page-115.htm>

Distribution électronique Cairn.info pour IRIS éditions.

© IRIS éditions. Tous droits réservés pour tous pays.

DÉFENDRE LES SOLS POUR NOURRIR LE MONDE

Christian Valentin

Directeur de recherche émérite à l'Institut de recherche pour le développement (IRD) et à l'Institut d'écologie et des sciences de l'environnement (iEES) de Paris, membre de l'Académie d'agriculture.

«**O**ù allons-nous développer l'agriculture capable de nourrir 9 milliards d'êtres humains? La crise globale de l'eau n'aura pas lieu. La crise de la terre commence»¹. Si, depuis des siècles, les terres fertiles ont suscité la convoitise des conquérants, la «faim de terres»², toujours actuelle, s'est diversifiée : les meilleurs sols se voient sacrifiés sur l'autel de l'étalement urbain, d'autres fournissent des produits non alimentaires (biocarburants, coton, latex, pâte à papier, substituts au plastique, etc.). Pourtant, les sols assurent toujours 95 % de la production alimentaire, mais au prix d'un lourd tribut à l'intensification agricole de ces dernières décennies³. Et de très nombreux facteurs menacent la sécurité alimentaire : réduction des gains de productivité, stagnation des surfaces cultivées, difficultés des gouvernances nationales et internationale (instabilité, manque de transparence, faiblesse de l'État de droits, inégalités intra- et inter-États, réduction des programmes de développement agricole), absence ou déficience des filières, extrêmes climatiques, conflits, pullulation de ravageurs, épidémies humaines, animales et végétales, et pauvreté persistante d'une grande partie des populations. Or, la crise économique actuelle, consécutive à la pandémie de Covid-19, rend encore moins réaliste le premier des objectifs de développement durable (ODD) des Nations unies, visant à ramener le taux de pauvreté en dessous du seuil de 3% en 2030. À cette pauvreté s'ajoute la fragilité des droits fonciers : dans le monde, 84% des exploitations disposent de moins de 2 hectares (ha), ce qui ne correspond qu'à 12% des terres cultivées⁴. Actuellement, 2,5 milliards de personnes utilisent encore des terres sans droits légalement garantis, hormis coutumiers⁵, d'où la directive internationale, hélas non contraignante, de «promouvoir des politiques et des lois permettant la reconnaissance de ces régimes fonciers informels»⁶.

1. Érik Orsenna, *L'avenir de l'eau*, Paris, Fayard, 2008, p. 471.

2. Gérard Chouquer, *Terres porteuses. Entre faim de terres et appétit d'espace*, Paris – Arles, Errance – Actes Sud, 2012, p. 246.

3. FAO, *The future of food and agriculture. Alternative pathways to 2050*, Rome, 2018, p. 60.

4. Sarah K. Lowder, Jakob Scoet et Terri Raney, «The Number, Size, and Distribution of Farms, Smallholder Farms, and Family Farms Worldwide», *World Development*, vol. 87, novembre 2016.

5. Peter Messerli et al., «Global Sustainable Development Report», New York, ONU, 2019, p. 216.

6. Comité de la sécurité alimentaire mondiale (CSA), *Directives volontaires pour une gouvernance responsable des régimes fonciers applicables aux terres, aux pêches et aux forêts dans le contexte de la sécurité alimentaire nationale*, Rome, FAO, 2012, p. 49.

Cet article se concentre sur deux défis majeurs en matière d'arbitrages d'usages et de gestion des sols : disposera-t-on de suffisamment de terres destinées aux productions alimentaires ? Et comment encore augmenter la productivité des sols sans les dégrader davantage ? La première partie portera sur les changements observés au cours des soixante dernières années, la seconde sur les scénarios possibles pour répondre aux besoins alimentaires de la population d'ici 2050.

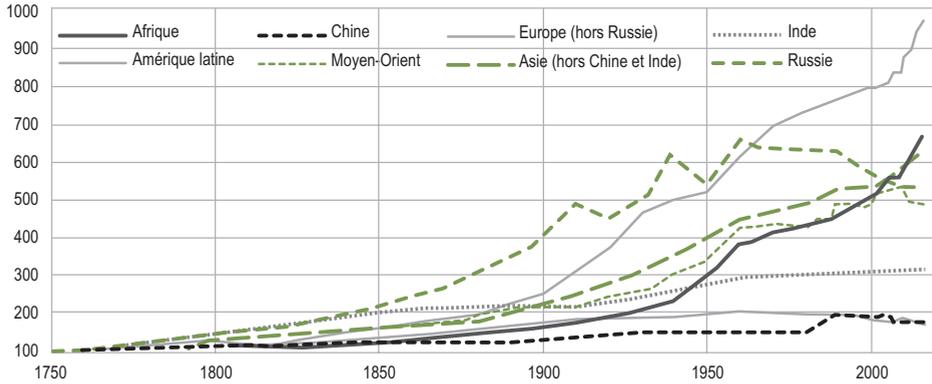
DES GAINS DE PRODUCTION AGRICOLE AUX DÉPENS DES SOLS

Intensification des surfaces cultivées et hausse de la production

Malgré une population mondiale qui a plus que triplé en soixante-dix ans, le taux de sous-alimentation dans les pays en développement, estimé par l'Organisation des Nations unies pour l'alimentation et l'agriculture (FAO) à 50% en 1945, a été réduit à 35% en 1970 et à 10,6% en 2015. Ce taux tend toutefois à augmenter de nouveau en 2018, à 23% en Afrique subsaharienne et 31% en Afrique de l'Est, rendant difficilement atteignable le deuxième ODD, c'est-à-dire l'élimination de la faim en 2030. Tandis que la production alimentaire par habitant s'accroissait de 39%, la disponibilité des terres, de 1945 à 2016, se réduisait de 0,49 ha/hab. à 0,19 ha/hab. du fait de l'augmentation de 134% de la population. Il reste que, de 1961 à 2016, la production mondiale de céréales a été multipliée par 3,3. Cette forte augmentation doit plus aux gains de productivité qu'à l'expansion mondiale des terres cultivées (+ 62%), au demeurant très contrastée selon les pays : multiplication par 10 au Viêtnam, par plus de 2 en Inde, alors qu'en Europe et en Russie, un maximum était atteint dès 1960 (figure n° 1). Ainsi, de 1961 à 2016, la France a perdu un peu plus de 17% de ses surfaces cultivées.

Contrairement aux prévisions alarmistes des années 1960, les gains de productivité agricole ont été spectaculaires. Entre 1961 et 2018, les rendements mondiaux ont ainsi été multipliés par 3,1 pour le blé, par 3 pour le maïs et par 2,5 pour le riz, mais seulement par 1,5 pour le manioc. Cette hausse s'est fondée sur l'amélioration génétique des espèces cultivées, les intrants minéraux et industriels (engrais, produits phytosanitaires), la motorisation et l'irrigation. La production alimentaire de ces dernières décennies s'est ainsi rendue tributaire de la fertilisation industrielle, dont la consommation mondiale a été multipliée par près de 7 en soixante ans – l'Afrique subsaharienne étant toutefois restée à l'écart de cette intensification.

Figure n° 1 : Terres cultivées, 1750-2016
(base 100 en 1750)



Source : PBL Netherlands Environmental Assessment Agency, History Database of the Global Environment.

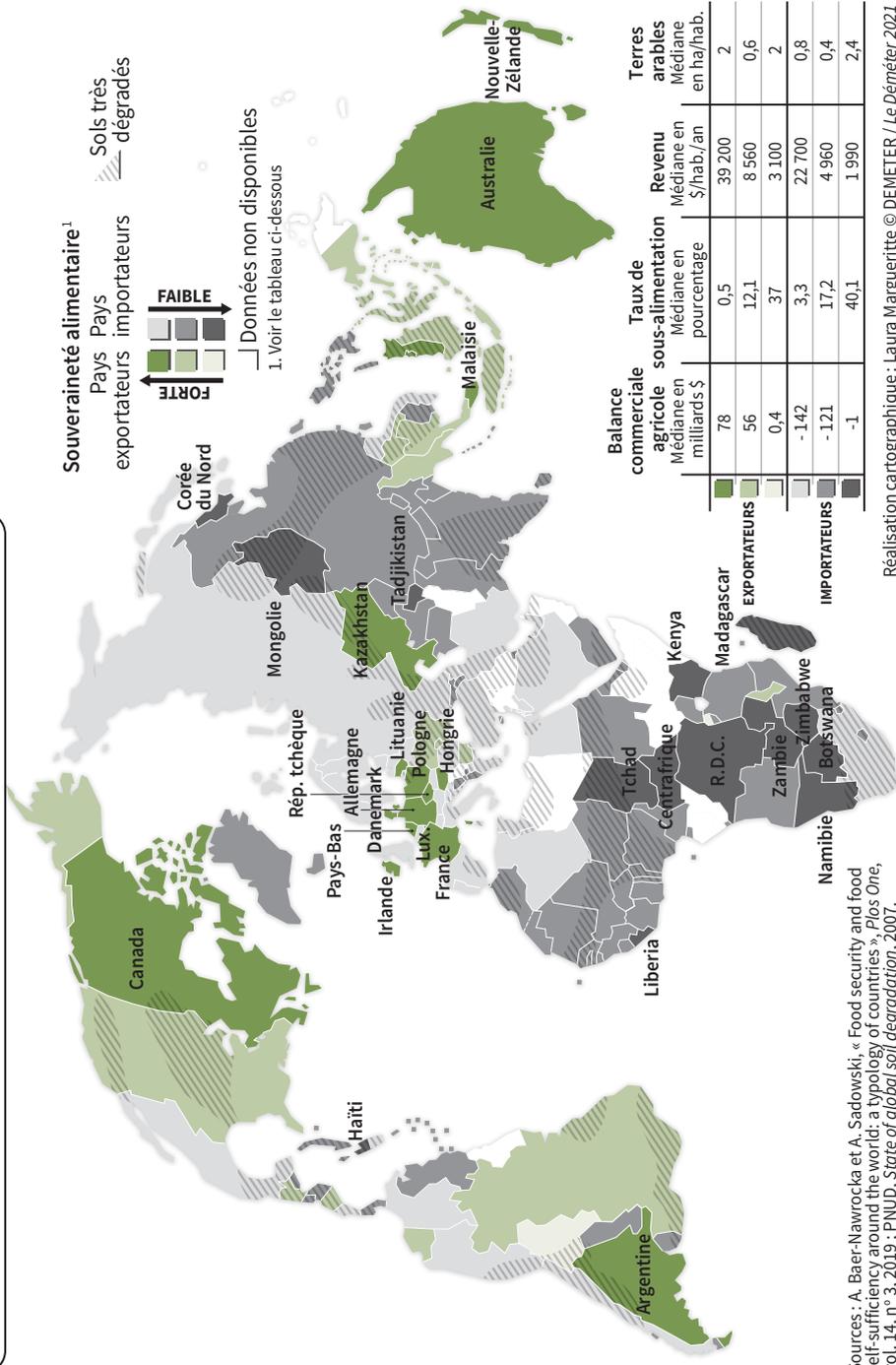
Souveraineté ou dépendance alimentaire ?

Les différences de surfaces agricoles disponibles et de qualité des sols entre régions du globe stimulent le commerce agricole international, qui augmente en moyenne de 8% par an depuis 2000. Malgré une faible surface de terres arables par habitant, le Brésil et plusieurs pays d'Asie du Sud-Est sont des exportateurs agricoles nets. À l'inverse, la souveraineté alimentaire de nombreux pays peut se trouver fragilisée par une trop forte dépendance aux importations (voir carte), particulièrement en période de crise, comme celle de 2008.

Emprises foncières de l'élevage, de l'énergie et de la ville

L'élevage occupe plus des trois quarts des terres agricoles. De 1961 à 2018, la production de viande a été multipliée par 5 dans le monde, par 35 en Chine, par 14 au Viêtnam, par 7 en Égypte, par 3 au Niger et par moins de 2 en France. À l'échelle du globe, une telle augmentation n'est pas liée à l'expansion des prairies permanentes et des pâturages, qui n'a été que de 4% sur la même période. Elle a surtout bénéficié de la spécialisation et de l'intensification de systèmes de production : améliorations génétiques, de la reproduction, de la santé et de la nutrition animales. Ainsi, 80% de la production de soja est désormais destinée à l'élevage. L'allocation de terres arables pour nourrir les animaux d'élevage fait de plus en plus débat, d'autant qu'à fourniture égale en calories ou en protéines, la production de viande exige de 10 à 100 fois plus de surface (tableau n° 1).

● Typologie des souverainetés alimentaires dans le monde



Sources : A. Baer-Nawrocka et A. Sadowski, « Food security and food self-sufficiency around the world: a typology of countries », *Plus One*, vol. 14, n° 3, 2019 ; PNUD, *State of global soil degradation*, 2007.

Tableau n° 1 : Besoins en terre pour la production de 1000 kilocalories (kcal) et de 100 grammes (g) de protéines d'origines animales et végétales

Origine	Terres nécessaires (m ²)	
	1000 kcal	100 g de protéines
Viande de bœuf	119,5	163,6
Viande de mouton	116,7	184,8
Lait	14,9	27,1
Viande de porc	7,3	10,7
Volaille	6,6	7,1
Œufs	4,3	5,7
Pois	2,2	3,4
Blé	1,4	3,2
Riz	0,8	3,9
Maïs	0,6	3,1

Source : Joseph Poore et Thomas Nemecek, « Reducing food's environmental impacts through producers and consumers », *Science*, vol. 360, n° 6392, juin 2018.

D'après la FAO, seulement 44% des terres cultivées sont désormais destinées à l'alimentation humaine directe, 33% à l'alimentation animale, 12% à l'industrie (coton, tabac, latex, etc.), 2% à la production de semences et 5% aux pertes après les récoltes. Ces pertes, estimées au champ, pourraient atteindre jusqu'à un tiers des récoltes¹ lorsque sont pris en compte les autres types de causes : stockage, conditionnement, transport, consommation. Les cultures de produits biosourcés, stimulés par la bioéconomie et le remplacement des produits dérivés du pétrole (biocarburants, bioplastiques et autres biopolymères) ne couvrent encore que 2% des terres. Il reste que, de 1990 à 2018, la production énergétique assurée par les biocarburants a été multipliée par plus de 12, la concurrence des biocarburants de première génération, comme le maïs, avec l'alimentation suscitant de vives controverses. D'une manière générale, la production d'énergie, hors carburants fossiles, est consommatrice de terres : la surface nécessaire pour produire 1 térawattheure (TWh) par an aux États-Unis² varie de 89 400 ha pour le biodiesel issu du soja, à 34 710 ha pour l'éthanol produit à partir du maïs, et à 28 560 ha pour l'éthanol provenant de la canne à sucre. Ces données sont à comparer aux 72 111 ha nécessaires pour produire de l'énergie éolienne terrestre, aux 3 695 ha pour l'énergie solaire photovoltaïque, aux 1 529 ha pour une centrale solaire thermodynamique et aux 49 ha pour l'énergie nucléaire. De plus, le rapport mondial entre sols artificialisés et sols cultivés a augmenté de 2% en 1960 à 4% en 2016³. Il s'élève à 9% aux États-Unis,

1. Jenny Gustavsson et al., *Global Food Losses and Food Waste: Extent, Causes and Prevention*, Rome, FAO, 2011, p. 37.

2. Isabelle Feix, « Sols et énergie », *Les Sols au cœur de la zone critique* (vol. 1), Paris, ISTE Éditions, 2018.

3. Kees Klein Goldewijk et al., « New anthropogenic land use estimates for the Holocene; HYDE 3.2 », *Earth System Science*

à 7% au Moyen-Orient, à 5% en Chine et en Europe – hors Russie –, et à 4% en Amérique latine. Or, ce sont les sols les plus productifs qui subissent les effets de l'étalement urbain, les villes s'étant le plus souvent développées dans les régions les plus fertiles.

Spéculation foncière et financiarisation des terres

Alors que le prix des denrées alimentaires a doublé entre 2002 et 2018, celui des terres arables a été multiplié par 6 dans le monde, soit une inflation annuelle moyenne de 12% – de 22% en Roumanie, de 13% en Argentine et en Australie, de 6% aux États-Unis et de 4% en France¹. L'encadrement du marché foncier a fait de la terre un bien financièrement plus attractif en France (6 000 euros/ha) qu'en Pologne (9 100 euros/ha), en Italie (40 000 euros/ha) et aux Pays-Bas (63 000 euros/ha). De telles augmentations, supérieures à celles de bien d'autres investissements, stimulent la spéculation et la financiarisation des terres. À cela s'ajoute la volonté de certains investisseurs d'acquérir des terres dans des pays étrangers pour produire des agrocarburants, sécuriser des filières alimentaires ou bénéficier de crédits carbone. Du fait de l'opacité de ces transactions, ainsi que des différences entre les projets prévus et ceux réellement mis en œuvre, les estimations des superficies concernées varient entre 25 et 67 millions d'hectares (Mha), ce qui représente entre 1,6% et 4,4% de l'ensemble des terres arables. Au sein des pays visés, cet accaparement des terres pose de nombreux problèmes socio-économiques, environnementaux et de souveraineté². En matière de superficies mises en exploitation, arrivent en tête l'Indonésie, l'Ukraine et la Russie, et parmi les pays investisseurs la Malaisie, les États-Unis et le Royaume-Uni.

Des ressources en sols dégradées

De nombreux sols ont été dégradés, particulièrement ces dernières décennies. Selon les critères et les niveaux de référence considérés, le pourcentage des surfaces concernées oscille de 15% à 75%³, toutes les estimations s'accordant sur le fait qu'aucune région du globe n'a été épargnée. La dégradation des sols affecterait ainsi plus de 3,2 milliards de personnes⁴, dont au moins 500 millions⁵

Data Discussions, décembre 2016.

1. Ian Bailey *et al.*, « Global Farmland Index », Savills, 2019.
2. Kerstin Nolte *et al.*, « International Land Deals for Agriculture. Fresh Insights from the Land Matrix: Analytical Report II », Land Matrix, 2016, p. 68. Voir aussi Klaus Deininger *et al.*, *Rising global interest in farmland: can it yield sustainable and equitable benefits?*, Washington, Banque mondiale, 2011.
3. Voir Stefan van der Esch *et al.*, *Exploring future changes in land use and land condition and the impacts on food, water, climate change and biodiversity: Scenarios for the UNCCD Global Land Outlook*, La Haye, Netherlands Environmental Assessment Agency, 2017; et Janne Sakari Kotiaho et Panu Halme, « The IPBES assessment report on land degradation and restoration », Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services (IPBES), 2018.
4. Ian Bailey *et al.*, *op. cit.*
5. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), *Climate Change and Land. An IPCC special report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems*, Genève, 2019.

dans les régions qui subissent la désertification¹. Entre 1961 et 2013, le nombre de terres soumises à des sécheresses a augmenté de 1 % par an. Les changements climatiques, en outre, exacerbent la dégradation des sols, particulièrement dans les zones basses du littoral, les deltas et les régions du *permafrost*². Toutes les études classent l'érosion comme la première forme de dégradation des sols. Sur les sols cultivés, elle est accélérée par l'absence de couvert une partie de l'année, par la pluie, par le vent et par le travail du sol sur pentes. Selon la FAO, elle serait responsable de la perte dans le monde de plus de 3 tonnes de sols par personne et par an³, soit environ 1 millimètre de décapage annuel, une vitesse de destruction de 10 à 100 fois plus rapide que celle de sa formation⁴. L'érosion est donc à la fois une cause et une conséquence de la diminution des teneurs du sol en matière organique : en effet, à la suite d'une déforestation, celles-ci peuvent chuter de 25 % à 75 %. Au cours des cultures, ces pertes en matière organique se poursuivent du fait de l'érosion, du travail du sol, de la non-restitution des résidus, du drainage et des sécheresses. En France, une réduction moyenne de 7 % du carbone organique a été mesurée en vingt-quatre ans au cours de 60 expérimentations⁵. Ces pertes entraînent une plus faible résistance des agrégats aux pluies et la formation de croûtes de battance, qui limitent la levée des semences, réduisent l'infiltration et favorisent le ruissellement, et donc l'érosion. Ce processus affecte plus particulièrement les régions limoneuses, ainsi que les zones arides et semi-arides⁶. La diminution des teneurs en matière organique favorise aussi le tassement des sols, qui affecterait 4 % des terres dans le monde, dont la moitié en Europe⁷. Le surpâturage en serait notamment responsable pour un sixième, le reste étant dû à l'utilisation d'engins lourds sur des sols humides, dans les champs mais aussi en forêt.

Tout comme le tassement, l'engorgement par l'eau des sols nuit à la plupart des organismes terrestres, car il provoque un manque d'oxygène. Il favorise aussi des émissions de protoxyde d'azote (N₂O) et de méthane (CH₄), deux gaz à effet de serre respectivement 298 fois et 28 fois plus puissants que le dioxyde de carbone (CO₂). Le réchauffement climatique peut ainsi être favorisé par l'engorgement des sols, par exemple dans les rizières. Cette obstruction de la terre peut aussi être due à l'absence de drainage dans des systèmes d'irrigation, à des infrastructures (sites industriels ou urbains, barrages), à des retenues collinaires, à la fonte des glaciers et du pergélisol. Ce phénomène gagne également du terrain dans les zones littorales basses du fait de l'élévation du niveau de la mer, particulièrement dans les deltas qui s'affaissent. Cette subsidence est accélérée par le moindre apport de sédiments dû à la multiplication des barrages en amont,

1. Désertification : dégradation des terres dans les zones arides, semi-arides et subhumides (définition de l'ONU).

2. Kerstin Nolte et al., *op. cit.*

3. Luca Montanarella et al., *Status of the World's Soil Resources*, Rome, FAO, 2015, p. 94.

4. Kerstin Nolte et al., *op. cit.*

5. Hugues Clivot et al., « Modeling soil organic carbon evolution in long-term arable experiments with AMG model », *Environmental Modelling Software*, n° 118, août 2019.

6. Voir Christian Valentin (dir.), *Les sols au cœur de la zone critique 5 : dégradation et réhabilitation*, Paris, ISTE Éditions, 2018.

7. Klaus Deininger et al., *op. cit.*

mais surtout par un excès de pompage dans les nappes, par des prélèvements de sable ou de pétrole. Ainsi, le delta du fleuve Chao Phraya, qui arrose Bangkok, s'enfonce de 5 à 15 centimètres par an (cm/an), celui du Niger de 2,5 à 12,5 cm/an¹, soit une vitesse bien supérieure à celle de l'élévation du niveau de la mer ces vingt-cinq dernières années (0,3 cm/an). Cet engorgement s'accompagne souvent de problèmes de salinisation. La concentration de sels ou de sodium dans les sols affecte ainsi près de 10% des terres émergées. La salinisation d'origine anthropique concerne 77 Mha², soit un cinquième des surfaces irriguées, et provoque l'abandon de 1,5 Mha/an³. Elle est due à l'utilisation d'eau saline ou à un manque d'apport en eau, d'où un drainage insuffisant des sels.

En raison des prélèvements répétés par le pâturage ou les récoltes, et des pertes par érosion, tout sol agricole tend à s'appauvrir en éléments nutritifs. Depuis le Néolithique, les jachères permettent de reconstituer ces stocks; leur réduction ou leur abandon doivent désormais être compensés sous forme d'engrais organiques ou industriels. Or, ces apports ne sont pas toujours possibles pour des raisons de disponibilité et de coût, particulièrement en Afrique, où l'utilisation d'engrais industriels reste très faible. Dès lors, 75 % des terres agricoles y subissent cet appauvrissement⁴. À l'inverse, une majorité de pays utilisent les engrais bien au-delà de leurs besoins, alors que les apports de fumiers et d'engrais azotés sont responsables de la moitié des émissions anthropiques de N₂O dans l'atmosphère. De plus, apportés sous forme ammoniacale (NH₃), les engrais azotés constituent une des causes principales de l'acidification des sols, provoquant une réduction sensible des rendements, particulièrement en Australie et en Asie du Sud-Est⁵. La moitié des sols cultivés aurait ainsi un potentiel hydrogène (pH) inférieur à 5,5⁶. Or, en dessous de ce seuil, la disponibilité des principaux éléments nutritifs chute fortement, alors que celle des métaux toxiques, comme l'aluminium, augmente. Les plantations de résineux ont aussi tendance à acidifier les sols, tout comme les pluies acides. Celles-ci sont encore importantes, notamment en Chine, du fait de la pollution de l'air par des combustibles soufrés (charbon, fioul, etc.). Les effluents de mines, également riches en soufre, favorisent aussi l'acidification des sols.

La pollution des sols peut donc s'observer sur de nombreux sites : mines abandonnées, friches industrielles, décharges, zones de déversements accidentels d'hydrocarbures, anciens champs de bataille, sites militaires, etc. L'Union européenne (UE) a ainsi inventorié 3,6 sites pollués par km² ⁷. Les polluants les plus

-
1. Janne Sakari Kotiaho et Panu Halme, *op. cit.*
 2. European Commission Joint Research Centre, *World Atlas of Desertification: Rethinking land degradation and sustainable land management*, Luxembourg, Office des publications de l'Union européenne, 2018.
 3. Md. Sanower Hossain, «Present Scenario of Global Salt Affected Soils, its Management and Importance of Salinity Research», *International Research Journal of Biological Sciences*, vol. 1, janvier 2019.
 4. Cargele Masso et al., «Soil Fertility Management in Sub-Saharan Africa», *Sustainable Agriculture Reviews*, n° 25, 2017.
 5. Klaus Deininger et al., *op. cit.*
 6. Zhongmin Da et al., «Potential role of biochars in decreasing soil acidification – A critical review», *Science of the Total Environment*, vol. 581-582, mars 2017.
 7. Ana Paya Pérez et Natalia Rodríguez Eugenio, *Status of local soil contamination in Europe. Revision of the indicator "Progress in the management contaminated sites in Europe"*, Luxembourg, Office des publications de l'Union européenne, 2018.

couramment impliqués sont les métaux lourds et les hydrocarbures pétroliers ou aromatiques, mais aussi, de plus en plus, les produits pharmaceutiques, les perturbateurs endocriniens et les micro-organismes pathogènes.

À cette pollution ponctuelle s'ajoute la pollution diffuse des sols agricoles : par exemple, les autorités chinoises estiment à 19% la part des terres cultivées polluées par l'eau d'irrigation contaminée, ou par l'épandage de déchets solides. Doivent aussi être prises en compte les pollutions dues à l'usage excessif d'engrais, de pesticides, de déjections animales, de boues d'épuration non traitées, ainsi que les retombées des polluants atmosphériques. De nombreux contaminants des sols – arsenic, plomb, cadmium, biphényles, hydrocarbures aromatiques polycycliques, et même antibiotiques – peuvent être absorbés par les plantes et nuire ainsi à la santé humaine, animale ou végétale. Toujours en Chine, 12 millions de tonnes de céréales sont contaminées par des métaux lourds chaque année, causant une perte de 2,4 milliards d'euros. Parmi les cas les plus pollués figurent les sols artificialisés, qui présentent toute une gamme de dégradation, depuis la destruction totale en quelques minutes lors du creusement de fondations, jusqu'à des sols ayant gardé la plupart de leurs fonctions dans des parcs périurbains.

Toutes ces formes de dégradation des sols contribuent à la réduction de leur biodiversité. Celle-ci est fortement affectée par les changements d'usage, l'utilisation d'intrants chimiques et par le travail du sol. L'agriculture intensive a ainsi provoqué une réduction de la richesse taxonomique de la faune du sol et de la diversité des groupes fonctionnels¹. Les grands organismes comme les vers de terre souffrent davantage des changements rapides d'usage des sols, alors que les plus petits réagissent davantage aux évolutions à plus long terme. La métagénomique² a confirmé que les diversités microbiennes, micro et mésofauniques, diminuent le long de la séquence « forêt, prairies, terres cultivées »³. Finalement, la plupart des formes de dégradation des sols interagissent. Par exemple, une réduction des teneurs en carbone organique favorise l'érosion qui, elle-même, en décapant la partie superficielle, accélère cette réduction, lançant une spirale de dégradation.

1. Xiaodong Chen *et al.*, « Soil biodiversity and biogeochemical function in managed ecosystems », *Soil Research*, vol. 58, n° 1, octobre 2019.

2. La métagénomique des sols est une méthode d'étude du contenu génétique, *via* le séquençage direct, de l'ADN d'échantillons prélevés sur le terrain pour étudier la biodiversité des micro-organismes.

3. Antonio Bispo *et al.* (dir.), « Actes du colloque. De la connaissance de la biologie des sols et de ses fonctions, à son pilotage », INRA – ADEME – AFB, 2018.

CONCILIER L'AUGMENTATION DE LA PRODUCTION ALIMENTAIRE ET LA PRÉSERVATION DES SOLS ?

Une productivité agricole qui plafonne

Selon les dernières projections de l'Organisation des Nations unies (ONU) pour 2050, la population mondiale devrait atteindre 9,7 milliards d'individus, avec une augmentation de 99 % en Afrique subsaharienne, de 46 % en Afrique du Nord, de 25 % en Asie du Sud – seulement 3 % en Asie du Sud-Est – et de 2 % en Europe et en Amérique du Nord. Pour satisfaire la demande alimentaire qui s'ensuivra, trois scénarios ont été définis par la FAO. Pour prédire les évolutions futures, plusieurs types de scénarios sont en effet souvent utilisés : un qui prolonge les tendances actuelles, et deux autres, au moins, qui prennent en compte des alternatives positives ou négatives en matière de durabilité des systèmes. Le premier suppose ici que la production agricole mondiale devra alors avoir augmenté de 40 %, le deuxième de 50 % et le dernier de 54 %¹.

Les scénarios d'évolution d'usage des sols se fondent sur plusieurs facteurs : démographie, croissance économique, productivité agricole, réglementations, inégalités, commerce international, préférences de consommation et changements climatiques – les plus déterminants étant la démographie et la productivité agricole². Or, par exemple pour les céréales, le taux annuel de croissance des rendements a diminué de 3,2 % en 1960 à 1,5 % en 2000, et devrait, d'ici 2050, se réduire encore, à 0,7 %. Un tel rythme ne suffirait pas alors à satisfaire les besoins. Les autres facteurs, comme la croissance économique, ont un impact plus limité sur les changements d'usage des terres, tandis que certains, tels que le changement des réglementations, sont plus difficiles à paramétrer dans les modèles.

Peu de possibilités d'expansion des cultures

Selon 15 estimations³, les terres encore disponibles pour les cultures dans le monde varient de 60 à 3 480 Mha. Cette valeur haute semble très largement surestimée, d'autant que la FAO considère que 1 500 Mha sont impropres aux cultures (faible profondeur de sol, salinité, acidité, engorgement, etc.). Les évaluations les plus basses paraissent plus vraisemblables, car elles tiennent compte de l'ensemble des obstacles physiques (températures, altitude, pente, état des sols) et légaux – par exemple, les terres protégées. Il n'existe déjà quasiment plus de nouvelles terres cultivables à potentiel élevé disponibles, particulièrement

1. FAO, *The future of food and agriculture*, op. cit.

2. Elke Stehfest et al., « Key determinants of global land-use projections », *Nature Communications*, vol. 10, n° 1, mai 2019.

3. David Eitelberg et al., « A review of global potentially available cropland estimates and their consequences for model-based assessments », *Global Change Biology*, vol. 21, n° 3, mars 2015.

dans la plupart des pays du Proche-Orient, d'Afrique du Nord et d'Asie du Sud. De plus, 70% des terres d'Afrique subsaharienne et d'Amérique latine, souvent considérées comme disponibles, notamment pour la production de biocarburants, souffrent en réalité de fortes contraintes liées à la faible productivité de leurs sols. Il s'agit, en outre, de réservoirs de biodiversité faisant de ces sols des éléments essentiels à la régulation climatique, comme au Brésil et en Argentine. Dès lors, ce n'est pas sur l'expansion des terres cultivées qu'il faut compter pour couvrir l'augmentation des besoins alimentaires d'ici 2050.

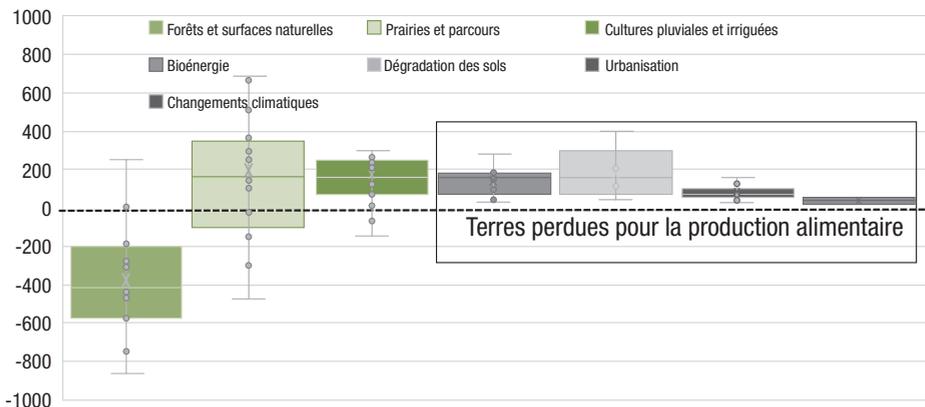
De moins en moins de terres destinées à la production alimentaire

La figure n° 2 présente les changements d'usage entre 2010 et 2050, exprimés en superficie, selon 26 scénarios récents pour les terres destinées aux cultures, 24 scénarios pour l'élevage, 16 pour les forêts, 15 pour la bioénergie, 14 pour l'urbanisation, mais seulement 5 scénarios pour l'abandon de terres du fait de leur dégradation, et 3 pour les changements climatiques. En outre, les intervalles des prédictions sont très larges pour les forêts et les terres agricoles.

Toutefois, si l'on s'en tient aux médianes, qui extrapolent, pour une bonne part, les tendances observées ces dernières décennies, plus de 400 Mha devraient être encore déforestés, soit 6,5% de la surface forestière mondiale de 2010. Les terres d'élevage devraient continuer à s'étendre de 150 Mha (+ 4,5%) et les sols cultivés de 140 Mha (+ 9,3%). Les scénarios les plus durables, souvent fondés sur des hypothèses de moindre consommation de produits animaux et sur une augmentation des rendements, prédisent, à l'inverse, une expansion des forêts de 255 Mha et une réduction des terres agricoles (- 470 Mha pour l'élevage, - 140 Mha pour les cultures). Tous prévoient néanmoins une perte supplémentaire des terres destinées à la production alimentaire directe (médiane de 400 Mha), faisant suite à l'abandon de sols dégradés (145 Mha), à la production de bioénergie (140 Mha), à l'urbanisation (70 Mha) et aux changements climatiques (45 Mha). Les changements d'usages seront les plus marqués en Afrique subsaharienne, où l'expansion des cultures (de 65 à 170 Mha), des terres destinées à l'élevage (165 Mha) et à la bioénergie (55 Mha) devrait provoquer une forte réduction des surfaces forestières et naturelles (- 300 Mha). Cette déforestation devrait cependant être plus modérée là où elle a été intense au cours des dernières décennies : - 90 Mha en Amérique latine et - 35 Mha en Asie du Sud-Est. La plupart des scénarios annoncent ainsi des conflits d'usage qui devront être arbitrés tant au niveau local qu'international. Cela pourrait prendre la forme d'une nouvelle gouvernance des sols, fondée sur une révision des droits fonciers et la considération des sols comme biens communs¹ au même titre que les autres composantes de l'environnement (air, eau, biodiversité).

1. Pierre Donadieu et al., «Les sols peuvent-ils devenir des biens communs?», *Natures Sciences Sociétés*, vol. 24, n° 3, 2016.

Figure n° 2 :
Changements d'usage des sols, 2010-2050 (en millions d'hectares)



Note : minimum, maximum, 1^{er} et 3^e quartiles, trait interne : médiane, X : moyenne.

Sources : Christoph Schmitz *et al.*, «Land-use change trajectories up to 2050: insights from a global agro-economic model comparison», *Agricultural Economics*, vol. 45, n° 1, janvier 2014 ; Stefan van der Esch *et al.*, *op cit.* ; Alexander Popp *et al.*, « Land-use futures in the shared socio-economic pathways », *Global Environmental Change*, vol. 42, janvier 2017 ; Jonathan C. Doelman *et al.*, « Exploring SSP land-use dynamics using the IMAGE model: Regional and gridded scenarios of land-use change and land-based climate change mitigation », *Global Environmental Change*, vol. 48, janvier 2018 ; FAO, *The future of food and agriculture*, *op. cit.* ; Chantal Le Mouel et Agneta Forslund, « Comment nourrir le monde en 2050 ? Une revue des réponses issues des études existantes basées sur des scénarios globaux », INRA, 2018 ; Robert T. Watson *et al.*, *Land Use, Land-Use Change, and Forestry*, IPCC, Cambridge, Cambridge University Press, 2000 ; et Guangzhao Chen *et al.*, « Global projections of future urban land expansion under shared socioeconomic pathways », *Nature communications*, vol. 11, n° 1, janvier 2020.

Produire plus et mieux sur moins de terres, tout en améliorant la qualité des sols

Face à l'augmentation des besoins, l'agriculture devra produire encore plus et, si possible, mieux d'un point de vue nutritionnel, sur des surfaces qui devraient peu augmenter, voire se réduire à cause des nombreux autres usages faits des sols. Or, si l'intensification agricole de ces dernières décennies a permis de répondre en grande partie à la demande alimentaire, elle a aussi montré ses limites : dégradation des ressources naturelles, émissions de gaz à effet de serre, risques pour la santé. Dès lors, il est nécessaire d'infléchir les modes de gestion des terres.

À cet égard, les scénarios fondés sur des principes de durabilité fournissent des pistes précieuses, puisqu'ils se fondent sur une réduction des inégalités entre les pays, en facilitant davantage les exportations des pays les moins avancés. Ils portent aussi une attention particulière aux petits exploitants agricoles les plus

défavorisés, et assurent une meilleure garantie de leurs droits fonciers. Une réglementation plus stricte de l'usage des terres apparaît, dans les simulations, comme une mesure efficace pour limiter l'expansion des terres agricoles aux dépens des forêts, avec toutefois un risque accru d'insécurité alimentaire en l'absence de hausse des rendements.

Ces scénarios montrent que certains modes de gestion des sols s'avèrent bénéfiques tant s'agissant de la sécurité alimentaire que de limitation de la dégradation des sols et de la désertification. Les trois premières options du tableau n° 2 permettent de concilier l'ensemble des objectifs : les pratiques de conservation des sols et d'amélioration du stock organique sont identiques. Au champ, il importe de maintenir un couvert proche du sol d'au moins 40% pour l'érosion hydrique, en laissant les résidus au sol. Les cultures associées ou intermédiaires et une alternance dans le temps et dans l'espace (rotations) doivent également être encouragées par rapport aux cultures les moins protectrices – comme le maïs –, avec des légumineuses ou des prairies. Sur les versants, il convient de veiller à la réduction de la vitesse du ruissellement pour limiter les risques de ravinement, en évitant de longues parcelles dans le sens de la pente, tout en favorisant les obstacles (talus, haies, fossés). Ces nombreuses pratiques, nécessairement adaptées aux situations locales, permettent généralement un meilleur stockage du carbone. Le secteur agricole qui, avec 24%, représente la deuxième source d'émissions de gaz à effet de serre, derrière la production électrique (25%), pourrait, *via* des changements de pratiques, contribuer à l'atténuation des dérèglements climatiques. Il suffirait, en effet, d'un taux de croissance annuel de 0,4% des stocks de carbone du sol (4 %/an), pour réduire de manière significative la concentration des gaz à effet de serre dans l'atmosphère. C'est l'objectif de l'initiative internationale «4 pour 1000» (4p1000), qui vise aussi, à travers cette augmentation, à l'amélioration de la productivité des sols. Or, comme évoqué précédemment, la tendance actuelle pour l'ensemble des sols cultivés est plutôt à une diminution des stocks de carbone¹, surtout pour les grandes cultures. Ce sont donc ces dernières qui offrent le potentiel le plus important d'augmentation, sous réserve d'une modification des pratiques² : extension des cultures intermédiaires (35% du potentiel total), agroforesterie intraparcellaire (19%), insertion et allongement du temps de présence de prairies temporaires (13%). Toutefois, cette dernière option pose des questions de production alimentaire (tableau n° 2). En France, l'adoption de l'ensemble des techniques préconisées permettrait de réduire de 6,8% les émissions nationales et de 41% les émissions agricoles³.

1. Hugues Clivot *et al.*, *op. cit.*

2. Sylvain Pellerin *et al.*, « Stocker du carbone dans les sols français, quel potentiel au regard de l'objectif 4 pour 1000 et à quel coût? », ADEME – INRA – Ministère de l'Agriculture et de l'Alimentation, 2019.

3. Christoph Schmitz *et al.*, *op. cit.*

Tableau n° 2 :
Impact des modes de gestion des terres sur la sécurité alimentaire,
la dégradation des terres et la désertification

Option de gestion des terres	Sécurité alimentaire	Moindre dégradation des terres	Moindre désertification
Pratiques de conservation des sols	vert foncé	vert foncé	vert foncé
Augmentation du stock organique des sols	vert foncé	vert foncé	vert foncé
Agroforesterie	vert foncé	vert foncé	vert foncé
Diversification des systèmes de culture	vert foncé	vert foncé	vert pâle
Lutte contre l'acidification et la pollution des sols	vert foncé	vert pâle	vert pâle
Moindre compaction des sols	vert pâle	vert foncé	blanc
Contrôle de l'urbanisation	vert pâle	vert pâle	vert pâle
Moindre déforestation	vert pâle	vert foncé	vert foncé
Reforestation	gris	vert foncé	vert foncé
Moindre retournement des prairies	gris	vert pâle	vert pâle
Afforestation	noir	vert foncé	vert foncé
Bioénergie	noir	noir	gris

vert foncé : très positif, vert clair : positif, vert pâle : faiblement positif, blanc : sans effet, gris : négatif, noir : très négatif
Source : adapté du rapport du GIEC sur les terres¹.

1. Kerstin Nolte et al., *op. cit.*

Dans les régions arides et semi-arides, l'érosion par le vent des faibles quantités de matière organique et des nutriments peut être combattue en augmentant, dans la mesure du possible, le couvert au sol et les brise-vents. À cet égard, l'agroforesterie est particulièrement intéressante dans les régions semi-arides, où la compétition pour la lumière des cultures et des arbres est moindre qu'en région tempérée, et où les différents niveaux racinaires permettent une meilleure utilisation des ressources en eau et en nutriments du sol.

Parmi les autres pratiques souvent préconisées figurent en bonne place celles de réduction du travail du sol, voire du non-labour. Si le travail du sol, notamment sur pentes, favorise l'érosion, induit des risques de tassement en conditions humides et réduit la biodiversité des sols, il s'avère nécessaire dans les zones sèches où, en détruisant régulièrement les croûtes de surface, il favorise l'infiltration et augmente ainsi les réserves en eau pour les cultures. Si le semis direct permet un meilleur stockage dans l'horizon superficiel, cet effet disparaît toutefois quand les mesures portent sur l'ensemble du profil¹. Ce n'est pas tant, en effet, le non-travail du sol qui permet une augmentation des teneurs en carbone organique du sol qu'une plus forte production de biomasse². Celle-ci est assurée par les plantes de couverture, qui nécessitent le plus souvent pour leur croissance des apports accrus d'engrais industriels, et pour leur destruction l'utilisation d'herbicides, le non-labour étant le plus souvent associé à l'usage du glyphosate. Il en découle des questions sur leur caractère réellement agroécologique et leur acceptabilité par la société.

À l'inverse de l'agriculture de conservation, l'agriculture biologique interdit les intrants industriels, mais permet le travail du sol. L'« agriculture écologiquement intensive » met l'accent sur l'usage des processus écologiques dans les agroécosystèmes pour augmenter la production tout en préservant l'environnement. Un des exemples les plus aboutis est la permaculture – « perma » comme permanente – qui, sans intrants industriels et avec un minimum de déchets, combine et tire parti de nombreuses pratiques (couvert du sol, polycultures multistrates, cultures intercalaires, agroforesterie, intégration agriculture-élevage), tout en prenant en compte les particularités des sols et de leurs fonctions. Si ces approches peuvent assurer, dans certaines régions, une autosubsistance alimentaire, il semble néanmoins peu probable qu'elles permettront, à elles seules, de répondre à la demande mondiale, particulièrement en céréales.

Reforestation ou afforestation ?

Si les forêts, composées de plusieurs espèces et dotées d'une litière et d'un recû, sont favorables aux fonctions des sols, il n'en est pas toujours de même pour les plantations commerciales d'arbres qui remplacent, parfois directement, la forêt

1. Alexander Popp *et al.*, *op. cit.*

2. Claire Chenu *et al.*, « Increasing organic stocks in agricultural soils: Knowledge gaps and potential innovations », *Soil and Tillage Research*, vol. 188, mai 2019.

primaire (« reforestation ») ou les cultures (« afforestation »). En effet, le plus souvent, par crainte de compétition avec les arbres, le recrû est détruit par le feu – pour le teck – ou par des herbicides – pour l'hévéa ou le palmier à huile –, ce qui favorise l'érosion, qui peut alors être bien supérieure à celle mesurée pour les cultures¹. De plus, le remplacement de cultures vivrières par des plantations commerciales pose un sérieux problème de sécurité alimentaire (tableau n° 2).

Énergie ou alimentation ?

Le débat sur la production de biocarburants est plus vif encore. Ceux de première génération détournent une partie de la production alimentaire vers l'énergie, en accentuant la volatilité des prix des denrées de base, tandis que ceux de seconde génération (plantes non alimentaires) consomment les terres arables disponibles et nécessitent souvent des intrants industriels, voire de l'irrigation. De plus, dans les deux cas, l'analyse des cycles de vie pose aussi la question cruciale de leur gain réel en matière de bilan carbone, et donc d'atténuation du réchauffement climatique.

Cultures péri- et intra-urbaines

Le développement des circuits courts et d'une bioéconomie circulaire ancrée dans les territoires préfigure une mutation des filières, dont les potagers périurbains et urbains sont des exemples. Bien qu'à terme, ces productions de proximité puissent fournir une part croissante des 62 millions de tonnes de légumes produites dans l'UE², il est peu probable qu'elles contribuent d'une manière significative à la production de céréales (295 tonnes). Les cultures hors-sol³, sous réserve qu'elles valorisent des déchets organiques, peuvent aussi contribuer à l'économie circulaire, même si elles reposent encore majoritairement sur l'utilisation d'intrants industriels. Quant aux fermes verticales urbaines, elles soulèvent de sérieuses interrogations de viabilité économique, énergétique et environnementale⁴. Cette préférence pour les produits locaux doit théoriquement amener à réduire les émissions de gaz à effet de serre dues aux transports, mais risque de s'avérer préjudiciable aux exportations des pays à revenus faibles ou intermédiaires.

1. Voir Olivier Ribolzi *et al.*, « From shifting cultivation to teak plantation: effect on overland flow and sediment yield in a montane tropical catchment », *Scientific Reports*, vol. 7, n° 1, juin 2017; Margot Neyret *et al.*, « Higher runoff and soil detachment in rubber tree plantations compared to annual cultivation is mitigated by ground cover in steep mountainous Thailand », *CATENA*, vol. 189, juin 2020.

2. Eurostat, *Agriculture, forestry and fishery statistics – 2019 edition*, Luxembourg, Office des publications de l'Union européenne, 2019.

3. Alain Bonjean, « Produire hors-sol, une solution pour la terre », in Sébastien Abis et Matthieu Brun (dir.), *Le Déméter 2020*, Paris, Club DEMETER – IRIS Éditions, 2020.

4. Voir Christian Valentin, « Les sols au cœur de la zone critique de la Terre », *Annales des Mines – Responsabilité et environnement*, FFE, n° 91, 2018/3.

Vers une combinaison de pratiques anciennes et d'outils numériques

Contrairement aux approches actuelles, souvent dogmatiques, concernant le travail du sol ou l'utilisation d'intrants industriels, les nouvelles pratiques devront probablement davantage s'adapter aux contextes. Par exemple, une utilisation raisonnée des engrais minéraux paraît nécessaire en Afrique subsaharienne, tout comme le travail du sol pourrait l'être au Sahel. Ailleurs, la productivité des terres cultivées devra moins reposer sur des apports encore accrus d'engrais industriels, en raison notamment des risques de pollution des sols et d'émissions de gaz à effet de serre. Un autre obstacle à l'utilisation de produits industriels est leur coût et leur disponibilité : la synthèse des engrais azotés exige une énergie encore issue des combustibles fossiles, alors que les réserves minières mondiales de phosphates pourraient se réduire fortement d'ici à la fin du siècle¹. De nouvelles formes d'intensification sont donc à concevoir et à mettre en œuvre. Elles surgiront d'hypothétiques découvertes scientifiques et de nouvelles ruptures technologiques. Plus sûrement, les savoirs locaux et les pratiques anciennes, trop vite décriés, devront être revisités, comme les rotations incluant des légumineuses, les cultures intermédiaires et associées (tableau n° 2), l'embocagement des paysages, l'intégration agriculture-élevage, etc. Plusieurs mutations sont d'ailleurs d'ores et déjà entamées². Ces approches anciennes pourront être combinées, au moins dans les pays à hauts revenus, à une agriculture de précision, grâce à la multiplication des capteurs bon marché, aux outils numériques, à la modélisation, à l'intelligence artificielle³, aux robots et aux drones⁴. Ces nouveaux outils permettent, en effet, de tenir compte de la variabilité intraparcellaire des sols pour adapter les doses d'intrants et d'irrigation, et limiter ainsi les risques de surconsommation et de pollution.

—

Dans les prochaines décennies (figure n° 2), les terres destinées à la production alimentaire devraient diminuer de 400 Mha sous l'effet de la dégradation des sols (érosion, salinisation, etc.), des changements climatiques, de l'urbanisation, mais aussi de la concurrence accrue pour d'autres productions (élevage, énergie, textile, autres produits biosourcés). Cette évolution correspond aussi à la nécessité de préserver la biodiversité et de favoriser le stockage du carbone dans les sols non cultivés.

1. Voir Bing Li et al., «Prediction of Future Phosphate Rock: A Demand Based Model», *Journal of Environmental Informatics*, vol. 31, n° 1, mars 2018; ainsi que le chapitre portant sur les phosphates dans cet ouvrage.

2. Lucas Garibaldi et al., «Farming Approaches for Greater Biodiversity, Livelihoods, and Food Security», *Trends in Ecology & Evolution*, vol. 32, n° 1, janvier 2017.

3. Anna Chlingaryan et al., «Machine learning approaches for crop yield prediction and nitrogen status estimation in precision agriculture: A review», *Computers and Electronics in Agriculture*, vol. 151, août 2018.

4. Umamaheswara rao Mogili et B. B. V. L. Deepak, «Review on Application of Drone Systems in Precision Agriculture», *Procedia Computer Science*, vol. 133, 2018.

Dès lors, les sols cultivés devront produire plus et mieux, en répondant aux défis de performances économique, sociale, sanitaire et environnementale¹.

Des prémices de cette transition agricole sont déjà à l'œuvre, *via* des innovations agroécologiques, technologiques et numériques. Elles doivent assurer des gains de productivité des sols ainsi que le maintien, voire l'amélioration de leurs autres fonctions. C'est dans ce cadre ambitieux que s'inscrivent deux initiatives internationales : 4p1000², qui vise à accroître la productivité des sols tout en augmentant leur teneur en carbone organique, et celle de la Neutralité en matière de dégradation des terres (NDT)³ qui, *via* des processus de compensation, cherche à promouvoir une réhabilitation des sols soumis à la désertification. Selon des principes analogues, et pour contenir l'étalement urbain, la France prévoit d'ici 2050 une «zéro artificialisation nette des sols»⁴. Une gestion plus durable des terres passe aussi par le développement de labels qui garantissent le respect de normes non seulement nutritionnelles et d'équité, mais aussi portant sur les sols (labels d'agriculture biologique, exploitation à haute valeur environnementale [HVE] du ministère français de l'Agriculture, etc.). Ces évolutions répondent à la demande croissante des consommateurs des pays industrialisés et émergents pour une nourriture de meilleure qualité. Elles doivent s'inscrire dans la régulation du commerce agricole international par la définition de normes, tant environnementales que sociales. À cet égard, une meilleure gouvernance du foncier exige également le rétablissement et le renforcement du multilatéralisme, mis à mal ces dernières années.

Un certain nombre de pratiques favorables à la multifonctionnalité des sols, comme la reforestation ou le moindre retournement des prairies, posent des questions de production alimentaire (tableau n° 2). Pour assurer l'alimentation de près de 10 milliards de personnes, des compromis seront en effet nécessaires, entre préoccupations environnementales (climat, sols, eaux, biodiversité) et réponses aux besoins alimentaires, tant au niveau du territoire que sur le plan international. Les tendances actuelles laissent présager que les approches agroécologiques continueront de gagner rapidement du terrain en regard de l'agriculture dite conventionnelle, dont le maître-mot a été l'uniformité, des peuplements végétaux et des traitements à l'échelle du champ comme des systèmes de production par grande région. Le prochain mot-clé devrait être la diversité, des produits agricoles et des pratiques. Celles-ci devront notamment tenir compte, au plus près, de l'hétérogénéité des sols à l'échelle du champ (texture, profondeur, etc.).

Si les erreurs commises ces soixante dernières années ne doivent pas être répétées dans les pays qui n'ont pas encore connu la phase d'intensification, il serait vain de tenter, à nouveau, de développer un modèle unique. Les approches comme l'agriculture biologique ou l'agriculture de conservation ne semblent pas pouvoir être d'emblée généralisables à l'ensemble de la planète. Par exemple, de nombreux

1. Académie d'agriculture de France, *Rapport du Groupe de travail «Transition alimentaire, filières et territoires»*, Paris, 2019.

2. Alexander Popp et al., *op. cit.*

3. Annette Cowie, *Guidelines for Land Degradation Neutrality: A report prepared for the Scientific and Technical Advisory Panel of the Global Environment Facility*, Washington, 2020.

4. Julien Fosse, «Objectif "zéro artificialisation nette" : quels leviers pour protéger les sols?», France Stratégie, 2019.

sols, particulièrement en Afrique subsaharienne, demeurent largement carencés en phosphore; dès lors, une fertilisation raisonnée pourrait aisément augmenter la production alimentaire de ces pays. Pour les sols cultivés sahéliens, très souvent sableux, la généralisation de l'agriculture biologique se heurte au manque de production de biomasse et, dès lors, de matière organique. De même, l'absence de tout travail de ces sols conduirait à un encroûtement généralisé, à une infiltration plus réduite et donc à des rendements plus faibles encore. Ainsi, la connaissance des sols doit davantage guider le choix des pratiques agricoles. Les systèmes de culture ne devraient pas obéir à des dogmes, mais à des principes écologiques, qui tiennent compte de la diversité des socio-écosystèmes.

ÉCONOMIE DU STOCKAGE AGRICOLE DE CARBONE DANS LES SOLS

Les États signataires de l'Accord de Paris en 2015, dans le cadre de la 21^e conférence des parties (COP21) à la Convention-cadre des Nations unies sur les changements climatiques (CCNUCC), se sont donné comme objectif commun de parvenir à un équilibre des émissions anthropiques de gaz à effet de serre (GES) d'ici à la seconde moitié du XXI^e siècle. Selon une logique en flux d'émissions nettes adoptée par plusieurs pays européens, la France s'est dotée d'un « plan climat » en juillet 2017, avec un objectif de « zéro émission nette » (ZEN) de GES à l'horizon 2050¹. La séquestration du carbone dans les sols est l'un des moyens envisagés pour atteindre cet objectif commun d'atténuation.

Le stock de carbone dans les sols agricoles résulte du solde entre les flux de carbone en entrée par l'importation de matière organique dans le sol et les flux de sortie générés par des mécanismes de minéralisation, d'érosion et de lixiviation². Les leviers d'action agroécologique pour stocker du carbone dans les sols agricoles sont de trois ordres : l'accroissement du rendement des cultures pour augmenter la production primaire de biomasse végétale; la restitution au sol des résidus de récolte ou la limitation du pâturage pour favoriser le retour au sol de cette biomasse; l'importation de matières organiques extérieures à la parcelle par apport de composts ou d'effluents d'élevage; enfin, une limitation des opérations de travail du sol visant à réduire la minéralisation³ des matières organiques.

Lancée par la France en décembre 2015 lors de la COP21, l'initiative « 4 pour 1000 » a pour but de fédérer l'ensemble des acteurs publics et privés autour d'un objectif de 4 ‰ du taux de croissance annuel du carbone stocké dans les 30 premiers centimètres du sol pour contribuer à limiter la hausse des températures à 2 degrés celsius. Les controverses suscitées par cette initiative ont montré la nécessité de disposer d'évaluations plus précises des potentialités de stockage du carbone dans les sols agricoles. Une étude récente conduite en France métropolitaine⁴ a permis d'évaluer neuf pratiques visant au stockage supplémentaire de carbone dans les sols agricoles (sans labour, extension des cultures de couverture, introduction de nouveaux intrants carbonés, extension des prairies temporaires, agroforesterie, couvertures du sol, intensification modérée des prairies extensives, pâture des animaux au lieu de la fauche, enherbement du vignoble) sur la base d'un maillage relativement fin (inférieur à 8 kilomètres carrés) du territoire métropolitain. Calculé sur trente ans, le stockage de car-

1. Alain Quinet et al., *La valeur de l'action pour le climat. Une valeur tutélaire du carbone pour évaluer les investissements et les politiques publiques*, Paris, France Stratégie, février 2019.

2. Processus d'extraction par l'eau percolant dans le sol.

3. Transformation, dans un milieu biologiquement actif, comme le sol, de substances organiques, aboutissant à la libération de substances minérales (ammoniac, eau, gaz carbonique, nitrates, phosphates, sulfates) qui jouent un rôle important dans la nutrition des plantes.

4. Sylvain Pellerin, Laure Bamière, Denis Angers, Fabrice Béline, Marc Benoit et al., « Identifying cost-competitive greenhouse gas mitigation potential of French agriculture », *Environmental Science and Policy*, vol. 77, novembre 2017.

bone supplémentaire est estimé entre 0,5 ‰ et 7,2 ‰ selon les pratiques concernées, avec cependant une forte variabilité spatiale selon les conditions pédoclimatiques et les stocks initiaux de carbone dans le sol. Au prix virtuel de 201,70 euros la tonne de carbone (équivalent à 55 euros la tonne de dioxyde de carbone [CO₂]), l'estimation de la quantité supplémentaire stockée serait de 4,06 millions de tonnes par an, au coût marginal de 159 millions d'euros par an. Les cultures intermédiaires de couverture des sols contribueraient pour 58% à ce stockage supplémentaire, l'intensification modérée des prairies extensives à 19%, les nouveaux intrants carbonés à 11%, et les prairies temporaires à 6%. Pour autant, l'atténuation du changement climatique induite par un stockage accru du carbone organique dans le sol est généralement surestimée si l'on ne tient pas compte des émissions de protoxyde d'azote (N₂O), un GES puissant, qui y sont associées et qui, sauf dans le cas d'un travail réduit du sol, ne sont jamais totalement compensées¹.

Cependant, certains facteurs socioculturels ou économiques peuvent minorer significativement les capacités physico-chimiques de stockage du carbone basées sur des pratiques agroécologiques, y compris dans les pays développés. Ainsi, aux États-Unis, les agriculteurs comptent parmi les catégories socioprofessionnelles les plus conservatrices : beaucoup contestent la vraisemblance d'une causalité anthropogène au changement climatique. En Californie, par exemple, les agriculteurs sont plus préoccupés par les contraintes réglementaires résultant du changement climatique que par les facteurs climatiques ayant des conséquences sur leur production ou exploitation. Souvent, ils accusent les experts non agriculteurs d'ignorer les contraintes économiques et réglementaires auxquelles ils sont confrontés. Aux États-Unis, le coût de la capture du carbone par le biais des programmes du Service de la conservation des ressources naturelles est estimé entre 32 et 442 dollars par tonne de CO₂, avec une moyenne de 183 dollars. Compte tenu du potentiel agronomique, de la structure de la propriété et des conditions d'affermage des terres agricoles dans un pays pourtant pionnier en matière de politiques de sauvegarde des sols, seules 2 à 5% des terres cultivées perçoivent des fonds dans le cadre des deux plus grands programmes de conservation présentant des avantages en matière de stockage du carbone, alors que seules 2% des terres agricoles sont proposées annuellement à la vente.

Pour l'Union européenne (UE), un groupe d'experts des marchés agricoles mandaté par la Commission propose également d'inciter les agriculteurs à stocker le carbone sur la base de pratiques agricoles adaptées. Or, d'une part, l'évolution des dispositifs réglementaires de la politique agricole commune (PAC) à l'horizon 2020 montre que les instruments proposés ne sauraient à eux seuls soutenir des projets à grande échelle sur le stockage agricole du carbone dans les sols en Europe : en effet, il est probable que le futur budget de la PAC soit insuffisant². D'autre part, le paquet climat et éner-

1. Bertrand Guenet, Benoît Gabrielle, Claire Chenu *et al.*, « Can N₂O emissions offset the benefits from soil organic carbon storage? », *Global Change Biology*, n° 27, 2020.

2. Cécile Détang-Dessendre et Hervé Guyomard (coord.), *Quelle politique agricole commune demain?*, Versailles, Quae, coll. « Matières à débattre et à décider », 2020.

gie de l'UE pour 2020 ne prend pas pleinement en compte le potentiel de réduction découlant de l'utilisation des terres et de leur changement d'affectation, interdisant aux États membres d'utiliser des mesures portant sur la gestion des terres pour compenser les émissions d'autres secteurs. Pourtant, un prix du carbone beaucoup plus élevé que la valeur actuelle – environ 40 dollars la tonne de CO₂ pour une parité entre le gaz et le charbon dans la production d'électricité – ainsi qu'un règlement visant à orienter le flux financier des émetteurs industriels et énergétiques vers le secteur agricole s'avèrent nécessaires et seraient conformes au principe du pollueur-payeur (article 191 du Traité sur le fonctionnement de l'UE). L'introduction d'une option d'utilisation des crédits compensatoires issus de projets agricoles dans le système européen d'échange de quotas d'émissions (SEEQE) nécessite la rédaction d'un règlement imposant l'établissement du niveau initial de carbone dans le sol et la vérification de la quantité de CO₂ séquestrée par les projets éligibles. Les périodes d'engagement doivent être établies sur des périodes décennales plutôt qu'annuelles, et légalement notifiées afin que de futurs acquéreurs soient tenus de respecter l'engagement sur le reste de la période. Des instruments supplémentaires devraient également cibler les consommateurs, en particulier ceux visant à orienter les choix alimentaires vers des produits alternatifs à la viande, par exemple *via* une taxe sur la viande. Cependant, de tels instruments doivent être compatibles avec les accords conclus sous l'égide de l'Organisation mondiale du commerce (OMC).

Pour les agriculteurs des pays en développement, les bénéfices privés des technologies de gestion durable des terres agricoles à l'horizon 2030 ont été évalués en 2012 à 105 milliards de dollars pour l'Afrique, 274 milliards pour l'Amérique latine et 1 400 milliards pour l'Asie, selon la Banque mondiale.

In fine, la décision d'adopter l'une ou l'autre des alternatives durables de gestion des sols ne saurait être uniquement fondée sur leurs avantages respectifs en matière d'atténuation du changement climatique, mais devrait plutôt intégrer la diversité des ateliers de l'exploitation agricole, évaluant ainsi de manière exhaustive l'efficacité technico-économique et l'impact environnemental du système productif. En effet, les changements d'utilisation des sols réduisant la production agricole peuvent entraîner un accroissement des rejets en carbone si la réduction de production implique une augmentation des importations d'aliments du bétail ou de denrées alimentaires. De nouvelles recherches visant à évaluer les effets des différentes stratégies de gestion durable des sols, au champ ou à la ferme, et leurs éventuelles incidences économiques dans les échanges agroalimentaires, au moins à l'échelle régionale, sont donc plus que jamais nécessaires.

Dominique Desbois

*Ingénieur statisticien à l'Unité mixte de recherche
Économie publique d'AgroParisTech et de l'Institut national
de recherche pour l'agriculture, l'alimentation et l'environnement (INRAE)*

NOTER LES SOLS CULTIVÉS POUR SURVEILLER LA SANTÉ DES TERRES DESTINÉES À L'AGRICULTURE

Après plusieurs années de recherche, la start-up Greenback a vu le jour en décembre 2019, avec l'ambition de répondre aux défis de la protection des sols et de la durabilité des modes de production agricole. En combinant big data et données physiques, Greenback s'adresse à un ensemble d'acteurs, des agriculteurs aux consommateurs, en passant par les investisseurs, pour aller dans le sens de la durabilité et de la transition. Quentin Sannié, fondateur de la start-up, revient sur ce projet.

CLUB DEMETER – Pourquoi créer une agence mondiale de notation des sols cultivés ?

QUENTIN SANNIÉ – Greenback comble un manque en ce qui concerne l'impact des pratiques agricoles sur l'environnement, en fournissant une mesure objective et opposable sur l'état de santé des sols à tous ceux qui les cultivent, s'y approvisionnent ou les financent. Cette notation indépendante oriente leurs choix opérationnels et leurs politiques. Nous pensons que disposer de cette évaluation de santé des sols va aider l'agriculture à se transformer. La notation va orienter de nombreux acteurs vers une préférence pour des sols en bonne santé et conduire à des changements profonds des pratiques et des arbitrages dès lors qu'ils intégreront cette nouvelle dimension dans leurs décisions.

Comment mesurez-vous l'état de santé des sols ?

QUENTIN SANNIÉ – Pour qu'elle soit opposable et universelle, nous avons voulu que notre méthode s'appuie sur une base scientifique robuste, qu'elle fournisse un langage commun et soit peu coûteuse. La notation – A (bonne santé du sol), B (points d'alertes) ou C (mauvaise santé) – repose exclusivement sur des analyses issues de prélèvements au sol. Ces analyses portent sur la biodiversité – à partir de l'analyse ADN du sol –, sur le carbone – selon un procédé issu de la recherche pétrolière –, et sur la pollution par des métaux lourds ou des résidus chimiques. Nous fournissons trois indices distincts et congruents sur l'état de cette biodiversité, sur le niveau de carbone et sur la pollution. Ensemble, ils rendent compte de la fertilité intrinsèque, de la résistance, mais aussi de la résilience aux variations du climat et aux pratiques agricoles, et de l'état sanitaire, permettant ainsi de renseigner la santé d'une parcelle. Pris séparément, ils correspondent aux principales attentes des clients : préservation de la biodiversité, lutte contre le changement climatique et protection de la santé des consommateurs.

Lorsque nous notons une parcelle, nous collectons massivement des données de contexte sur l'environnement de pollution et de biodiversité de cette parcelle, ainsi que sur le climat et les pratiques agricoles, dans des bases de données environnementales, topographiques, géologiques et à partir d'analyses d'images satellitaires. Les données

issues des analyses terrain sont associées à ces données contextuelles au sein d'un dispositif d'intelligence artificielle qui produit un modèle prédictif permettant, d'une part, de noter de grandes surfaces agricoles à partir d'un échantillonnage limité et, d'autre part, d'anticiper l'évolution de l'état de santé d'une parcelle à partir d'une comparaison avec des parcelles similaires. Cette approche nous a valu le soutien de la direction scientifique de la Convention des Nations unies sur la lutte contre la désertification (UNCCD), une des trois conventions issues du Sommet de la Terre de Rio de Janeiro en 1992.

En quoi la connaissance de l'état de santé des sols permettrait-elle d'accompagner la transition du monde agricole ?

QUENTIN SANNIÉ – L'état de santé des sols est le reflet des pratiques agricoles. Mieux gérer les sols requiert une évaluation factuelle et objective de leur état. Et, pour la première fois, Greenback rend possibles la mesure et le suivi quantifiable de l'état de santé des terres cultivées. Ces informations entendent être le fondement des changements de comportements qui s'imposent désormais pour favoriser un consensus autour de bonnes pratiques. Précisément, un agriculteur mieux informé de son impact peut prendre des décisions éclairées. Il est donc plus libre et responsable de ses choix. Il s'agit aussi de fournir des données factuelles aux promoteurs des différentes solutions de conduite de la transition agricole, et ainsi de sortir de querelles inutiles nourries par le manque d'outils et de protocoles de mesures.

Où en êtes-vous du développement de Greenback ?

QUENTIN SANNIÉ – Nous menons, depuis mai 2019, des projets-pilotes avec des agriculteurs, des coopératives, des industriels, des collectivités locales et des banques. Grâce à ces acteurs, nous testons nos protocoles scientifiques et techniques et éprouvons nos dispositifs opérationnels. Nous apprenons également beaucoup sur les usages futurs de la notation. Trois circonstances principales se dégagent. Premièrement, les certifications, par exemple pour la compensation carbone – nous mesurons la performance de puits carbone des sols –, pour la valorisation des produits – origine et état certifié du milieu – ou pour les futures rémunérations publiques pour services environnementaux. Deuxièmement, les transactions pour évaluer les actifs fonciers au moment de leur achat ou de leur mise en location. Enfin, la surveillance des approvisionnements pour la création de filières d'approvisionnement contrôlées et valorisées. Construire cette agence de notation est un vrai défi. Après plus de deux ans de développement, nous préparons notre lancement commercial pour le printemps 2021. Nos partenaires pionniers seront aussi nos premiers clients.