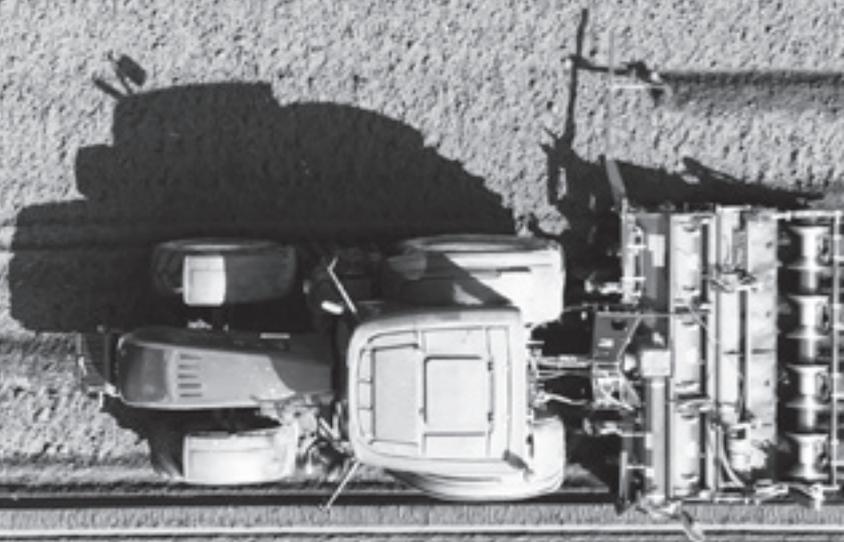


**Changement
climatique**

**pourquoi la
solution**

**ne viendra
pas de
l'édition
génomique**



alliance suisse
pour une agriculture
sans génie génétique





**Changement
climatique**

**pourquoi la
solution**

**ne viendra
pas de
l'édition
génomique**

Éditeur
Alliance suisse pour une agriculture
sans génie génétique

L'agriculture est à la fois responsable et victime du changement climatique. D'une part, elle émet une grande partie des gaz à effet de serre, ceux-ci provenant surtout de l'élevage intensif et de son corollaire, la production de fourrages concentrés. D'autre part, de par son lien avec la nature, l'agriculture est touchée de plein fouet par la hausse des températures moyennes et la baisse continue des précipitations. Vu ce double rôle, les solutions à trouver doivent emprunter deux pistes: réduire d'une part les effets des pratiques agricoles conventionnelles, et de l'autre, adapter la production aux conséquences néfastes du changement climatique.

Comme ces rôles sont interdépendants, la manière la plus efficace de résoudre les problèmes est de procéder par une approche globale de la chaîne de production agricole. Mais au lieu de chercher des solutions systémiques durables, l'agro-industrie mise sur des opérations de marché et des technologies à but lucratif qu'elle porte aux nues comme des panacées, par exemple l'ingénierie génétique. Elle ne considère cependant que des aspects partiels des problèmes et pense à court terme, ne tenant pas compte des retombées à plus longue échéance de ces technologies sur le climat et la nature. Pour elle, une évaluation des risques est en effet sans intérêt. De son côté, le lobby de l'industrie du génie génétique vante à présent les plantes et les animaux édités génétiquement comme étant la réponse aux plus grands défis écologiques actuels, ainsi qu'il le faisait il y a dix ans pour les produits du génie génétique classique. Tout comme les organismes transgéniques se sont révélés inutiles comme

plan de sauvetage, les nouvelles techniques de l'ingénierie génétique n'offrent pas de solution durable au problème du changement climatique. Car l'édition génomique n'est qu'une réponse à voie unique aux problèmes qu'engendre l'agriculture intensive. Son but: perpétuer une agriculture axée sur la performance et le rendement. Au lieu de prendre le problème à la racine, l'agro-industrie ne traite que les symptômes et encourage une intensification encore plus poussée des élevages de masse et des monocultures. Et cela au prix de la diversité – celle des cultivars, des types de culture et des variétés sauvages – essentielle pour des systèmes agricoles flexibles. Selon le GIEC, les modèles gourmands en surfaces proposés pourralentir le changement climatique ne sont pas des solutions durables. La concurrence pour l'utilisation du sol entraîne en outre la disparition des petites exploitations paysannes, si importantes pour nourrir la planète.

Les techniques de l'agroécologie sont la meilleure option pour garantir l'approvisionnement alimentaire de l'humanité, même sur fond de changement climatique. Contrairement à l'ingénierie génétique, l'agroécologie n'est pas une «boîte à outils». C'est une approche holistique (globale), interdisciplinaire, basée sur la coopération pratique de la science, de la paysannerie et des mouvements sociaux. La plupart des plus de 500 millions de familles de petits paysans qui produisent 80 % des aliments consommés dans le monde entier appliquent ce modèle.¹ Largement répandues et pratiquées au champ depuis des décennies, les méthodes de l'agroécologie sont particulièrement prometteuses, car elles augmentent l'adaptabilité au changement

climatique.² L'agroécologie préconise une production locale diversifiée, adaptée aux conditions régionales. Ce modèle crée de bonnes conditions pour faire front au changement climatique et trouver des solutions constructives pour nourrir la planète.² Des sols plus sains contribuent à la protection du climat en stockant de l'eau et du carbone. Le rétablissement de l'état préindustriel des sols permettrait à lui seul de capter 30 à 40 % de l'excédent actuel de CO₂ dans l'atmosphère.³ D'autre part, la réduction de l'utilisation des engrais synthétiques et organiques fait baisser les émissions impactant le climat.⁴ La biodiversité et une variété accrue des méthodes culturales rendent la production plus résiliente. L'agroforesterie – un système qui associe sur la même parcelle les grandes cultures et les arbres – offre un grand potentiel en matière de protection du climat, par exemple par une meilleure utilisation des ressources existantes, en favorisant un microclimat qui permet d'augmenter les rendements.

Des initiatives internationales (par exemple, «4 pour 1000»)⁴ ne sont pas les seules à avoir reconnu l'urgence de se détourner d'une agriculture industrielle focalisée sur l'augmentation de la production alimentaire. L'Organisation des Nations unies pour l'alimentation et l'agriculture (FAO) a formulé en 2018 les principales lignes directrices de l'agroécologie⁵ ainsi qu'un programme de mise en œuvre.⁶

Chapitre 1

Adapter les systèmes de production aux conséquences du changement climatique

- P 13 Pertes de rendement dues à des conditions climatiques extrêmes, à la propagation de nouveaux ravageurs et maladies

- P 14 Le problème
- P 15 Des plantes robustes et tolérantes au stress grâce à l'édition génomique?
- P 17 Pourquoi l'édition génomique n'est pas une solution
- P 20 Solutions alternatives à l'édition génomique

Chapitre 2

Réduire les effets perturbateurs de l'agriculture sur le climat d'où proviennent les gaz à effet de serre dans l'agriculture?

P 25 Réduire les effets perturbateurs de l'agriculture sur le climat d'où proviennent les gaz à effet de serre dans l'agriculture?

Méthane

P 26 Le problème

P 27 L'édition génomique contre les émissions de méthane?

P 28 Pourquoi l'édition génomique n'est pas une solution

P 29 Solutions alternatives à l'édition génomique

Protoxyde d'azote

P 31 Le problème

P 32 L'édition génomique contre les émissions de protoxyde d'azote?

P 33 Pourquoi l'édition génomique n'est pas une solution

P 35 Solutions alternatives à l'édition génomique

Dioxyde de carbone

P 38 Le problème

P 39 L'édition génomique contre les émissions de CO₂?

P 40 Pourquoi l'édition génomique n'est pas une solution

P 42 Solutions alternatives à l'édition génomique



Made in Bulgaria
AMMONIUM NITRATE 34% PERLE
1000 K.G.

Made in Bulgaria
AMMONIUM NITRATE 34% PERLE
1000 K.G.

Made in Bulgaria
AMMONIUM NITRATE 34% PERLE
1000 K.G.

Made in Bulgaria
AMMONIUM NITRATE 34% PERLE
1000 K.G.

Made in Bulgaria
AMMONIUM NITRATE 34% PERLE
1000 K.G.

Made in Bulgaria
AMMONIUM NITRATE 34% PERLE
1000 K.G.

Made in Bulgaria
AMMONIUM NITRATE 34% PERLE
1000 K.G.

Made in Bulgaria
AMMONIUM NITRATE 34% PERLE
1000 K.G.

Made in Bulgaria
AMMONIUM NITRATE 34% PERLE
1000 K.G.

Made in Bulgaria
AMMONIUM NITRATE 34% PERLE
1000 K.G.

Made in Bulgaria
AMMONIUM NITRATE 34% PERLE
1000 K.G.



Chapitre 1

Adapter les systèmes de production aux conséquences du changement climatique

Pertes de rendement dues à des conditions climatiques extrêmes, à la propagation de nouveaux ravageurs et maladies

Le changement climatique a dans le monde entier de nombreux effets néfastes, qui sont également ressentis dans les zones tempérées. Dans nos régions aussi, mis à part quelques effets positifs tels que de plus longues périodes de végétation, permettant d'allonger les périodes de production ou de se tourner vers de nouvelles cultures, les effets négatifs l'emportent. Les pronostics annoncent par exemple qu'en Europe centrale aussi, les étés secs vont devenir nettement plus fréquents dans la seconde moitié du siècle, et qu'ils vont toucher 40 millions d'hectares supplémentaires de surfaces arables.⁷ Cela signifie notamment que des cultures comme celle de la pomme de terre, qui pouvaient jusqu'ici se passer d'apports d'eau complémentaires, devront à l'avenir être irriguées.

Les pays du Sud en voie développement, qui disposent de peu de possibilités d'adaptation, souffrent particulièrement des effets néfastes du changement climatique, qui engendre des pertes de récoltes.^{8,9} La sécurité des rendements est affectée par exemple par la pression accrue des ravageurs, des hivers plus doux, des conditions météorologiques extrêmes et la pénurie d'eau. Il est clair que des solutions urgentes sont nécessaires pour relever ces défis. L'agro-industrie mise ici avant tout sur l'ingénierie génétique. Des « améliorations » de la génétique devraient permettre d'accélérer la sélection de plantes plus résistantes, moins sensibles aux maladies et plus tolérantes au stress. Celles-ci contribueraient à l'augmentation durable de l'offre en denrées alimentaires et autres produits agricoles, améliorant ainsi la sécurité alimentaire.

Ces nouveaux organismes sortis des laboratoires d'ingénierie génétique sont cependant développés dans le contexte et dans la logique de l'agriculture industrialisée. Et cela a des répercussions. Car d'une part, cette vue mercantile accroît encore la dépendance des agriculteurs aux semences brevetées par un petit nombre de multinationales. Et de l'autre, les manipulations de quelques relais jugés

importants dans le génome d'un organisme – indépendamment de la précision des procédés utilisés – se sont très souvent révélées globalement néfastes pour celui-ci. Au lieu de créer un nombre restreint de cultivars édités génétiquement pour des productions à grande échelle, il faut qu'il y ait un changement de paradigme, orienté vers une augmentation durable de la résistance des cultures.

Conditions climatiques extrêmes, ravageurs et maladies

Le problème

Le changement climatique confronte l'agriculture à un défi sans pareil. L'accumulation des gaz à effet de serre dans l'atmosphère induit des modifications multiples, en constante progression, du système climatique. Aux dires de la science, il faut s'attendre à une augmentation des conditions climatiques extrêmes. Les modélisations montrent que la température moyenne globale va encore augmenter.^{10,11} Les épisodes de chaleur et sécheresse extrêmes vont devenir plus fréquents et durer plus longtemps.⁷ Dans les pays en voie de développement, les pertes directes pour l'agriculture dues aux sécheresses survenues entre 2005 et 2015 représentent 29 milliards de dollars US.¹² En outre, plus de 70% de l'eau douce disponible sur la planète est déjà utilisée pour l'irrigation des surfaces cultivées.¹³

La sécheresse n'est toutefois que l'un des effets néfastes des changements du système climatique. Certains phénomènes météorologiques comme les tempêtes violentes, les précipitations torrentielles et les inondations subséquentes devraient devenir plus fréquents, aussi bien aux latitudes moyennes que dans les régions tropicales humides. Par ailleurs, les surfaces où seules des cultures halotolérantes (aptées à supporter de très fortes concentrations de sel) peuvent encore prospérer sont en augmentation. Le GIEC pronostique une élévation du niveau des mers d'un mètre d'ici 2100.¹⁴ Avec une montée des eaux de moitié déjà, environ 2 millions d'hectares de terres seront submergés par de l'eau salée, ce qui affectera principalement les zones de rizières. Dans les pays développés, c'est l'agriculture intensive qui augmente la salinité des sols.

Ces phénomènes extrêmes provoquent l'érosion, la désertification et la salinisation des sols, préteritnant les rendements et la production alimentaire mondiale. Les entreprises du secteur de la biotechnologie suggèrent que la production de denrées alimentaires ne peut

être maximisée qu'au moyen des nouvelles méthodes de l'ingénierie génétique, l'enjeu étant de pouvoir nourrir la population de la planète en augmentation.¹⁵ Le système cultural conventionnel doit être adapté aux nouveaux défis, c'est incontestable, mais il existe de nombreuses autres approches systémiques qui permettent d'atteindre cet objectif avec plus d'efficacité sans recours à l'ingénierie génétique.

L'élévation annoncée des températures moyennes profite aux insectes nuisibles provenant de régions plus chaudes. Ceux-ci pourront surmonter les anciennes barrières géographiques, se multiplier à l'avenir plus facilement dans les zones tempérées et devenir ainsi des espèces envahissantes. Il faut s'attendre également à ce que de nouvelles pathologies végétales se propagent plus rapidement et menacent les récoltes, là où elles n'étaient pas présentes jusqu'ici.^{16, 17, 18}

Conditions climatiques extrêmes, ravageurs et maladies

Des plantes robustes et tolérantes au stress grâce à l'édition génomique?

L'édition génomique contre le stress abiotique (c'est-à-dire, provoqué par des facteurs non biologiques, par opposition au stress biotique, découlant de l'action d'organismes vivants)

Pour répondre à ces défis, l'agro-industrie propose avant tout la création, par édition génomique, de cultivars tolérants au stress abiotique et plus productifs même dans ces conditions néfastes. Selon ses défenseurs, l'édition génomique devrait présenter des avantages par rapport à la sélection conventionnelle, principalement de par son applicabilité rapide et la précision qu'on lui prête.

Ces promesses ne sont pas nouvelles. Il y a 20 déjà, l'ingénierie génétique classique promettait d'apporter au monde des plantes capables de supporter les sécheresses sans dommages en garantissant des rendements élevés. Si elle n'a pas fourni de résultats satisfaisants, c'est que la tolérance à la sécheresse est une propriété complexe. Pour faire front au manque d'eau, les plantes ont développé diverses stratégies contrôlées par un réseau de fonctions génétiques couplées. Quand l'eau se fait rare, la plante doit se concentrer sur sa survie et mettre en veilleuse toutes ses autres fonctions non vitales, comme la croissance ou la production de semences. Ces compromis entre défense contre le stress et rendement font que l'ingénierie génétique classique n'a pas réussi à créer des plantes tolérantes à la sécheresse. Cette tolérance à la sécheresse acquise par des manipulations génétiques induisait généralement des pertes de rendement. En outre, lorsqu'une période froide et pluvieuse succédait à une sécheresse, la modification génétique avait une influence négative sur le rendement.¹⁹

Les biotechnologues espèrent maintenant pouvoir dissocier ces mécanismes génétiques couplés et intervenir, au moyen des nouvelles techniques d'ingénierie génétique,

sur plusieurs sites à la fois dans la génétique impliquée dans la tolérance à la sécheresse. On a déjà identifié chez la plante modèle *Arabidopsis* de nombreux caractères essentiels intervenant dans la réaction à la pénurie d'eau, notamment le moment de la floraison, le nombre et la régulation génétique des stomates responsables de l'évaporation, la production de la cuticule protégeant contre les pertes d'eau, les cascades moléculaires de l'allocation du carbone ainsi que l'architecture de la racine. Selon les spécialistes en biotechnologie, plusieurs de ces caractères pourraient théoriquement être adaptés simultanément, au moyen de ciseaux moléculaires, dans les principales plantes cultivées, et sans que ces manipulations n'influencent le rendement.

S'agissant du maïs, on essaie de réduire sa sensibilité à l'éthylène.²⁰ L'éthylène est une hormone végétale qui joue un rôle important dans la manière dont la plante réagit au stress abiotique, comme la pénurie d'eau ou des températures élevées, en inhibant notamment la division et l'expansion cellulaires. Il est donc possible d'accroître le rendement en jugulant la production d'éthylène et en réduisant la sensibilité de la plante à cette phytohormone.

Cette diminution de la sensibilité est due à l'activité accrue des gènes appelés ARGOS. À long terme, toutefois, une augmentation de l'activité de ces gènes entraîne des pertes de rendement lorsque les conditions de culture sont optimales. C'est pourquoi les scientifiques essaient de modifier au moyen du CRISPR/Cas les régions du génome qui contrôlent l'expression des gènes ARGOS, de manière à n'obtenir qu'une expression modérée, ce qui devrait empêcher les pertes de rendement même dans des conditions optimales.²⁰

Parallèlement aux recherches menées sur la tolérance à la sécheresse, les biotechnologues travaillent à l'augmentation de la tolérance au

sel des variétés de riz classiques très productives,²¹ et affirment qu'en cas de réussite, on aura trouvé la solution la plus économique et la plus écologique pour le contrôle de la salinité du sol.

L'édition génomique contre les nouveaux pathogènes et ravageurs

L'édition génomique permet également l'introduction rapide de gènes de résistance dans des cultures importantes, pour les protéger de maladies émergentes. La méthode est déjà à l'essai pour des maladies répandues. On essaie ainsi de conférer au manioc – un légume-racine contenant de l'amidon faisant partie de l'alimentation de base en Amérique du Sud, en Afrique et en Asie – la résistance à un virus de la mosaïque²² qui détruit actuellement 20 % des récoltes.²³

Pour combattre les nuisibles envahissants, la recherche travaille sur une application particulièrement dangereuse des ciseaux moléculaires. La technique de forçage génétique (gene drive en anglais) utilise ces derniers pour forcer la transmission d'un caractère introduit artificiellement à toute la descendance lors de la reproduction.²⁴ Les séquences modifiées du génome sont transmises à 100 % à tous les descendants, même si elles présentent des désavantages pour l'individu. On essaie de combattre avec cette technique la mouche *Drosophila suzukii*, un insecte en provenance d'Asie qui provoque en Europe aussi des pertes massives dans les cultures de baies et de fruits. Outre *Drosophila suzukii*, la recherche génétique s'intéresse à plus d'une douzaine d'autres insectes.²⁴

Conditions climatiques extrêmes, ravageurs et maladies

Pourquoi l'édition génomique n'est pas une solution

Argument 1

Le rendement sur de petites parcelles n'est pas égal au rendement des cultures à grande échelle

Les exemples précités montrent que pour l'agriculture industrielle, le développement de plantes tolérantes au stress doit avant tout servir à obtenir des rendements élevés. Le rendement n'est cependant que l'une des caractéristiques importantes d'une variété.

Les interventions en laboratoire ainsi que les mesures lors des essais sous serre se basent sur des modèles fortement simplifiés. Le principe de base consiste en général à assoiffer les plantes pendant une longue période, puis à les arroser copieusement. Le rendement est le premier critère d'évaluation. Des facteurs importants, comme l'humidité du sol ou la biomasse végétale, ne sont souvent pas pris en considération.¹⁹ Par ailleurs, les essais en plein champ sont souvent conçus de manière superficielle et lacunaire. Les pratiques culturales sont fortement standardisées et les essais limités dans l'espace et dans le temps.^{25, 26} La valeur prédictive de ces essais est très restreinte quant à la réaction d'une variété au champ à différentes conditions pédologiques (qualité des sols) et climatiques. Les expériences faites avec les méthodes classiques du génie génétique montrent que cela peut avoir des conséquences désastreuses pour les agriculteurs qui investissent dans la coûteuse semence génétiquement modifiée ainsi que dans les produits phytosanitaires et les engrais associés. Si l'on sort les nouvelles techniques d'ingénierie génétique du champ d'application de la loi sur le génie génétique, les nouveaux cultivars vont rapidement être mis sur le marché, en complète méconnaissance de leurs performances dans différentes conditions de plein champ, ainsi que de leurs risques.

Argument 2

Une plante n'est pas la somme de ses éléments constitutifs

Le succès du projet consistant à créer par édition génomique des plantes tolérantes à la sécheresse et le sel ou des plantes plus productives est incertain. Il s'agit en effet de caractères polygéniques, c'est-à-dire contrôlés par plusieurs, voire plus d'une centaine de gènes,²⁷ chacun ayant un petit effet sur l'expression du caractère en question. C'est la somme de ces effets qui détermine finalement le caractère.²⁸ L'expression d'un caractère dépend par ailleurs fortement de l'interaction entre le génome et l'environnement. Ce réseau complexe de fonctions génétiques ne peut être reproduit par les interventions ponctuelles de l'édition génomique, même si plusieurs sont exécutées en même temps (multiplexing). De plus, le multiplexing augmente fortement le risque d'impact sur d'autres processus. En effet, les caractères qui influencent la tolérance au stress ne sont pas indépendants les uns des autres, pas plus qu'ils ne le sont des autres propriétés de l'organisme. Un être vivant ne peut pas être modifié selon le principe des systèmes modulaires. Autrement dit, la manipulation du génome d'une variété haute performance visant à la rendre plus tolérante à la sécheresse n'est pas sans conséquences. Une intervention dans le génome, aussi petite et précise soit-elle, a presque toujours des répercussions sur d'autres processus physiologiques fondamentaux de la plante.^{29, 30, 31}

Même lorsque l'on accroît le rendement par la méthode de l'édition génomique, il faut s'attendre à des modifications indésirables qui vont agir sur d'autres propriétés.³⁰ Or, ces modifications restent souvent méconnues, car pour l'industrie, les effets collatéraux sont d'intérêt secondaire, ce qui fait qu'ils ne sont guère étudiés.

En regard de toutes ces incertitudes, c'est faire fausse route que de vouloir conférer aux variétés largement répandues et haute performance, obtenues par une sélection à outrance, des gènes de tolérance en plus.

Argument 3

Les résistances impliquant un petit nombre de gènes ne durent pas longtemps

Pratiquement tous les projets de recherche utilisant la nouvelle technique d'ingénierie génétique pour rendre des plantes (ou des animaux) résistants à des maladies consistent à modifier certains gènes de leur patrimoine génétique ou à en rajouter quelques-uns. Or, les résistances durables, tout comme la tolérance au stress ou le rendement, sont contrôlées par un grand nombre de gènes. Les résistances monogéniques – reposant sur un ou quelques gènes seulement – sont généralement instables.²⁸ Les variétés munies d'une résistance monogénique deviennent au bout d'un certain temps à nouveau vulnérables aux maladies. En effet, l'avantage sélectif permanent procuré aux variants les plus virulents des pathogènes entraîne, avec le temps, une forte prolifération de ceux-ci. La résistance «s'effondre». Il en va de même des plantes produisant des insecticides: des variants de ravageurs contre lesquels la toxine de la plante modifiée est impuissante ne tardent pas à se propager, même lorsque la plante produit plusieurs variantes de la toxine en même temps.^{32,33} Le génie génétique classique offre à cet égard de nombreux exemples tragiques qui ont ruiné maintes exploitations agricoles.³⁴ La seule différence de la nouvelle technique est que les gènes souhaités peuvent être introduits plus rapidement. Le principe reste le même, raison pour laquelle il faut s'attendre tôt ou tard à ce que l'édition génomique connaisse de sévères échecs.

Autre inconvénient: les plantes que les généticiens essaient d'équiper avec certains gènes de résistance pour le compte de l'agriculture industrielle sont généralement des variétés déjà issues d'une sélection à outrance, génétiquement pauvres et donc faibles et dépendantes de produits chimiques protecteurs.³⁵ Un exemple extrême est celui de la banane vendue chez nous. Seule une variété de banane de table est cultivée dans le monde – en général, sous forme de gigantesques monocultures.³⁶ Si cette variété est menacée par un virus, comme c'est actuellement le cas, un «bricolage» au moyen du CRISPR/Cas n'apportera pas de solution viable. Des constructions et des systèmes aussi fragiles ne peuvent pas être sauvés par l'implantation de quelques gènes. Un seul gène, introduit indépendamment du contexte de l'information génétique, ne peut pas compenser la diversité génétique perdue et n'offre en l'occurrence qu'une protection de brève durée.

Il existe à ce jour peu de données sur les effets secondaires indésirables de ces résistances introduites au moyen de ciseaux moléculaires. Mais intervenir dans le génome peut très bien avoir des conséquences sérieuses, comme le prouve le cas d'un manioc modifié par édition génomique, où l'utilisation de la technologie CRISPR a conduit à l'apparition de nouveaux virus mutés, susceptibles de menacer la culture de manioc dans son ensemble.²²

Argument 4

Schémas réactionnels prédéfinis

Si les phénomènes météorologiques résultant du changement climatique – les épisodes de sécheresse, par exemple – étaient prévisibles, on pourrait encore imaginer une solution technologique immédiate permettant d'accroître la tolérance de la plante. Or, cela n'est pas le cas, car c'est précisément cette imprévisibilité qui caractérise les différents phénomènes météorologiques.

Un long été sec peut succéder à un hiver très humide, et l'année suivante, l'eau se fera rare en hiver aussi, ou une période de sécheresse sera suivie d'une inondation. Une plante doit pouvoir s'adapter et réagir à chaque cas de figure.³⁷ Un programme uniforme, introduit par ingénierie génétique, ne peut lui conférer cette capacité d'adaptation.

Une autre problématique est la dépendance des agriculteurs ainsi créée: ceux-ci doivent racheter chaque année les semences modifiées brevetées. Les sécheresses et leur durée sont imprévisibles, et l'utilité de la modification apportée avec des ciseaux moléculaires est relative, selon la durée et le type des épisodes. On peut dès lors se demander s'il fait sens, en regard de tant d'incertitudes, d'acheter de la coûteuse semence modifiée.

Argument 5

Forçage génétique - une fois lâchés dans la nature, ils ne sont plus récupérables

Fait inquiétant, les recherches utilisant le forçage génétique chez les insectes sont déjà bien avancées,²⁴ alors qu'il n'existe actuellement pas de procédure mondialement reconnue pour l'évaluation des risques de leur dissémination. Lorsqu'un organisme modifié par forçage génétique est relâché, il est pratiquement impossible de contrôler ou d'inverser ses impacts sur l'écosystème. Les modifications génétiques pourraient se transmettre à des espèces sauvages et menacer fortement la biodiversité.³⁸

Compte tenu de ces risques, il importe d'évaluer très soigneusement si le recours au forçage génétique est raisonnable tant que l'on ignorera si, et comment, il déploie son effet dans des écosystèmes naturels. Car son efficacité dépend de nombreux facteurs, dont la dynamique de population du ravageur et le développement de résistances, souvent observé, contre le mécanisme du forçage génétique.²⁴

Conditions climatiques extrêmes, ravageurs et maladies

Solutions alternatives à l'édition génomique

Alternative 1

Adaptabilité à grande échelle grâce à la diversité

Pour permettre à la nature de s'adapter, il lui faut avant tout de la diversité: diversité de la génétique, des espèces et des méthodes culturales. La biodiversité protège des effets néfastes du changement climatique.³⁹ Elle est le réservoir sur lequel la sélection opère, mais aussi celui des systèmes agroécologiques résilients. Des récoltes stables à long terme ne sont possibles qu'avec des systèmes agroécologiques sains. Autrement dit, il ne suffit pas pour cela de modifier quelques séquences isolées du génome d'une espèce. Pour rendre les cultures plus résistantes, il faut partir de la diversité génétique existante et adapter l'ensemble du système.

La disparition des variétés et des espèces est pour une grande part due à l'agriculture intensive. Les grandes monocultures traitées aux herbicides ne laissent pas de place à la diversité. Cet appauvrissement est observable non seulement au champ même, mais aussi, et de plus en plus, dans les milieux naturels attenants.⁴⁰ Si la diversité continue de régresser à ce rythme dans les zones tampons, vu leurs fonctions essentielles pour l'écosystème, les effets négatifs des aléas météorologiques vont s'intensifier.

Par ailleurs, avec l'apparition de variétés à haut rendement depuis les années 1950, le nombre des plantes cultivées constituant notre alimentation de base a passé de plusieurs milliers à une bonne poignée seulement.⁴¹ Pour le secteur agroalimentaire, seules ces cultures principales valaient en effet la peine, économiquement parlant, d'être développées, et ce au détriment de la diversité des variétés et des espèces cultivées – un constat alarmant.

Une augmentation de la diversité permettrait de mieux amortir les risques du changement

climatique et de produire suffisamment de nourriture. La diversité génétique, spécifique et variétale est une garantie d'adaptabilité. Dans des systèmes biologiques diversifiés, il est plus probable de trouver des espèces ou des individus résistants qui, grâce à leur bagage génétique, arrivent à mieux s'accommoder du nouvel environnement. Les systèmes diversifiés, grâce à leur richesse spécifique ou génétique, résistent mieux aux conditions météorologiques extrêmes, aux maladies ou aux espèces envahissantes.

Théoriquement, il existerait encore un choix de plusieurs dizaines de milliers de plantes sauvages et de variétés traditionnelles comestibles, adaptées aux conditions locales.⁴¹

La tolérance et la résistance à la chaleur et à la sécheresse, tout comme les résistances à certains ravageurs, vont à l'avenir jouer un rôle croissant dans le choix des cultures et des variétés. Les plantes utiles qui n'occupaient jusqu'ici qu'une place de second ordre sur le marché mondial et dans la recherche – on parle de plantes ou de cultures orphelines («orphan crops») – ont beaucoup de potentiel.⁴² Certaines, comme le millet, l'amarante ou l'okra (gombo), pour ne citer que les plus connues – restent aujourd'hui à l'ombre des quatre principales: le blé, le maïs, le riz et le soja, nos aliments de base. Pourtant, de nombreuses plantes orphelines sont non seulement plus résistantes, mais riches sur le plan nutritif – ce qui les rend intéressantes pour la sélection de demain. Promouvoir la sélection de nouvelles variétés peut valoir la peine, comme le montre l'exemple du quinoa, une plante encore totalement méconnue en Europe il y a dix ans, et maintenant proposée par les chaînes de restauration rapide. Les petites exploitations profiteraient de récoltes stables, et le risque de carences diminuerait grâce à un plus grand choix de plantes fournissant une variété de substances nutritives.

Le retour au vaste réservoir génétique des anciennes variétés est également jugé efficace pour l'adaptation au changement climatique.⁴²

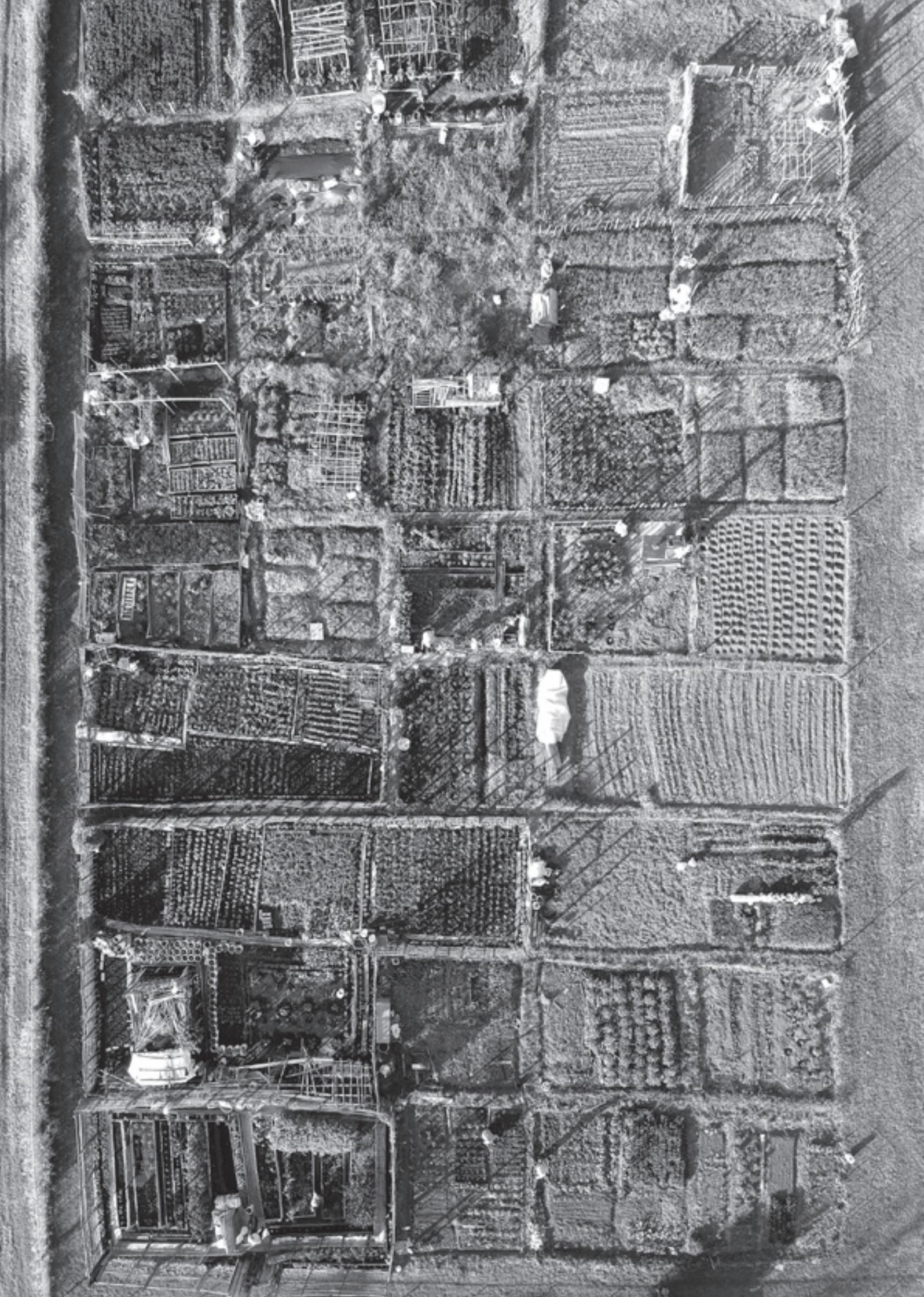
Un peu comme les variétés orphelines, les anciennes variétés indigènes recèlent dans leur génétique de précieuses qualités qui manquent aux cultivars modernes à haut rendement, comme des résistances à certains agents pathogènes et à certains ravageurs ainsi qu'au stress abiotique.^{44,45} De plus, il s'agit de populations dynamiques avec un bagage génétique diversifié, contrairement à leursendants génétiquement uniformes cultivés en monoculture. Elles ont en tant que telles une plus grande capacité d'adaptation et, malgré les changements de l'environnement, des rendements plus stables même sans intrants chimiques.⁴⁶ De plus en plus d'exemples prouvent^{47,48,49} que le savoir ancestral lié aux anciennes variétés indigènes est une importante réponse aux défis du changement climatique.⁵⁰ Ce savoir adapté aux conditions locales est un précieux élément des approches agroécologiques. Ces variétés peuvent être multipliées librement, ce qui est un atout supplémentaire, car les agriculteurs ont la possibilité de les développer encore et sont indépendants à l'égard des multinationales du secteur semencier. Le développement de variétés locales résilientes nécessite des modèles de sélection novateurs, impliquant la paysannerie locale. Des projets participatifs tels que Citizen Science (sciences citoyennes), où des citoyens engagés prennent en charge le travail scientifique, permettent de répertorier les variations spatiales et temporelles de l'environnement afin de caractériser les réactions climatiques et de développer des variétés adaptées aux besoins des régions.^{51,52}

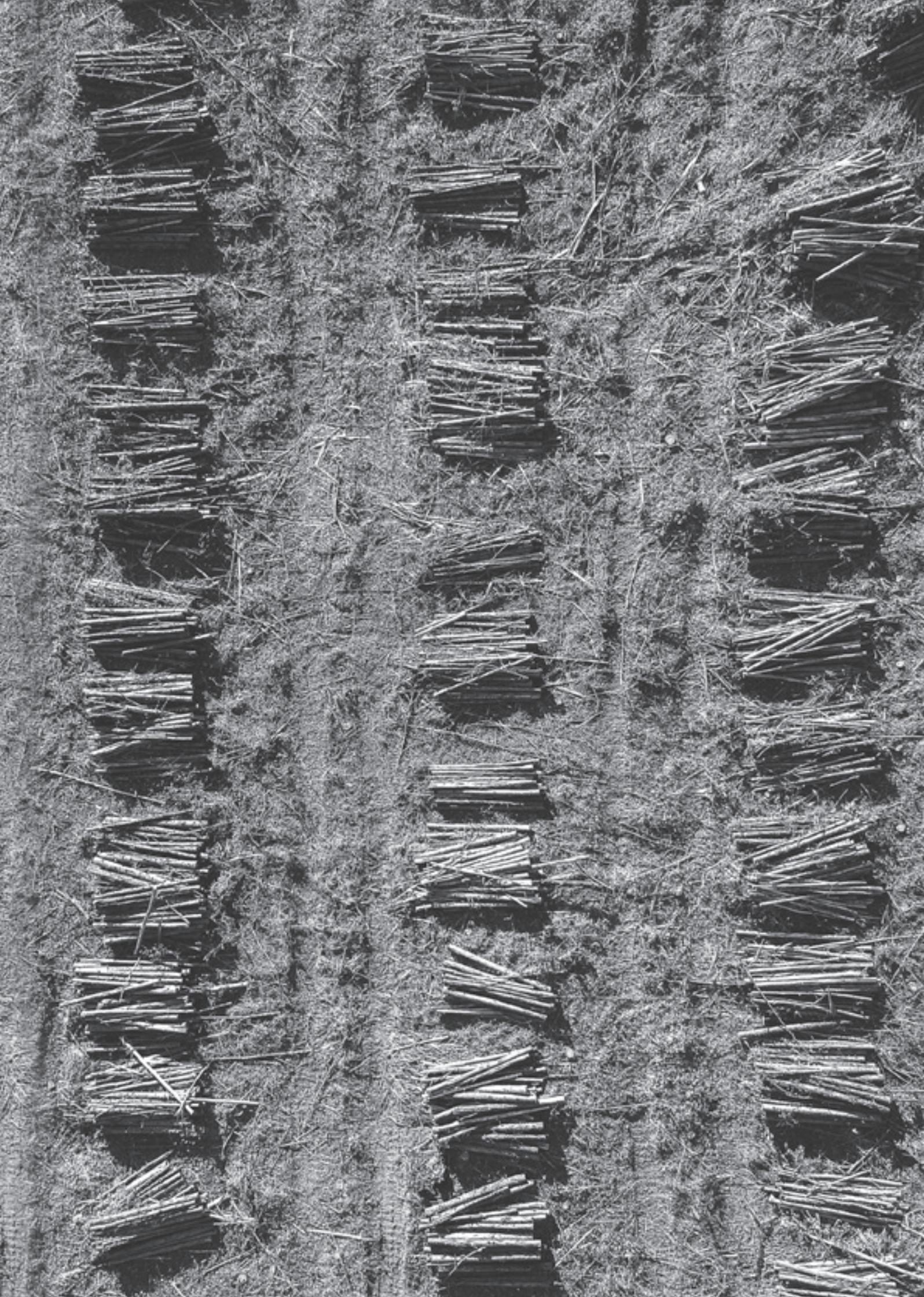
Alternative 2

Gestion et santé du sol

Des pratiques améliorées et conservatrices de gestion des sols, qui sont courantes dans les approches agroécologiques ou dans l'agriculture écologique, aident de diverses manières à résister aux défis du changement climatique,^{42,53} notamment en permettant de produire des sols fertiles, plus riches en humus. Ménager le sol, c'est contribuer à optimiser son régime hydrique, pour lui permettre de mieux stocker l'eau et la rendre ainsi disponible pendant les périodes sèches. Un engrais vert entre les cultures principales, par exemple, améliore la structure du sol et évite le tassement. De plus, le sol est ainsi moins exposé à l'érosion et à la désertification.⁵⁴

Ce genre de mesures aident à perpétuer les importantes prestations du sol aux écosystèmes, comme le cycle des nutriments et le cycle de l'eau. Sans elles, la production alimentaire ne peut se maintenir et en aucun cas augmenter.





Chapitre 2

Réduire les effets perturbateurs de l'agriculture sur le climat d'où proviennent les gaz à effet de serre dans l'agriculture?

D'où proviennent les gaz à effet de serre dans l'agriculture?

L'agriculture et la foresterie sont responsables de 20 à 25% des émissions mondiales ayant un impact négatif sur le climat.^{55,56,57} En Suisse, l'agriculture produit 13% de la totalité des gaz à effet de serre anthropogènes^{54,58,59} (créés par les activités humaines). Parmi ces gaz, il faut citer le dioxyde de carbone (gaz carbonique), le méthane et le protoxyde d'azote. Leurs molécules empêchent par réverbération l'évacuation de la chaleur de la surface terrestre dans l'espace.

Le gaz carbonique est le plus connu des gaz à effet de serre. Il est libéré lors de la combustion d'énergies fossiles, par la déforestation et lors de la dégradation de la matière organique des sols par l'agriculture. Le méthane et le protoxyde d'azote ont toutefois un impact nettement plus néfaste. La plus grande partie de leurs émissions provient de l'élevage intensif et de la production de concentrés qui lui est associée. Le méthane (CH₄) provient en premier lieu de la digestion des ruminants mais, pour une plus petite part aussi, de l'utilisation des engrais de ferme.

L'élevage joue surtout un rôle indirect dans la production du protoxyde d'azote (N₂O), par la culture de plantes fourragères, mais aussi par l'épandage du fumier et du lisier. Les émissions de protoxyde d'azote proviennent surtout de l'exploitation des sols, en particulier de la dégradation des engrais synthétiques azotés utilisés en quantités massives dans les monocultures intensives. La production des engrais dégage en outre du méthane et du protoxyde d'azote.^{57,60} Cette source d'émissions est toutefois largement sous-estimée par l'industrie des engrais elle-même.⁹⁴

Pour trouver une réponse durable aux effets négatifs sur le climat du modèle agricole actuel, il importe de comprendre que les différents gaz à effet de serre produits lors des opérations agricoles s'influencent mutuellement et qu'il

ya des interactions entre certains éléments. Les interventions humaines dans ce système ont par conséquent des effets complexes sur le système climatique. L'apport d'engrais azotés stimule par exemple la croissance des plantes, si bien qu'elles assimilent plus de dioxyde de carbone atmosphérique – ménageant ainsi le climat. Cet effet favorable est cependant moindre que l'effet délétère du protoxyde d'azote libéré par le sol fertilisé.⁶¹ C'est pourquoi une vision d'ensemble des divers cycles s'impose. Autrement dit, la réflexion doit être axée sur les systèmes. Les approches purement technologiques, basées sur des modèles extrêmement simplifiés et n'intervenant qu'à certains niveaux du système, comme l'édition génomique, n'offrent pas cette possibilité.

Méthane

Le problème

Une vache produit chaque année entre 70 et 120 kg de méthane.^{62,68} Comme le méthane nuit 23 fois plus au climat que le dioxyde de carbone, l'émission de 100 kg de méthane correspond à la quantité de CO₂ qui serait produite par la combustion de 1000 litres ou 2300 kg d'essence. Avec cette quantité de carburant, on pourrait parcourir en voiture environ trois fois la distance entre le point le plus à l'est et le point le plus à l'ouest de l'Europe. En Suisse, plus de 80 % du méthane émis dans le pays proviennent de l'agriculture, dont presque 80 %⁶⁰ de l'élevage, en particulier de la détention de bovins.

Méthane

L'édition génomique contre les émissions de méthane?

Le tractus intestinal des bovins est colonisé par des milliers de micro-organismes divers. Seuls 3% de ceux-ci produisent du méthane.^{63,64} Dépourvus de noyau cellulaire et proches des bactéries, ils privilégient les milieux extrêmes, comme la panse des ruminants, et sont capables de synthétiser du méthane à partir de la matière organique. La recherche entend modifier ces micro-organismes de manière qu'ils produisent moins de méthane pendant la digestion.⁶⁵ En même temps, on essaie d'identifier les gènes favorisant ces micro-organismes méthanogènes^{66,67,68} lors de la reproduction. La prochaine étape sera l'«optimisation» des ruminants eux-mêmes à coups de ciseaux moléculaires.⁶⁹

Une nouvelle «mode» a fait par ailleurs son apparition pour réduire les effets délétères de la consommation de viande sur le climat. Des alternatives à la viande, qui imitent à s'y méprendre le goût de celle-ci, fabriquées avec des additifs issus de l'ingénierie génétique, sont censées diminuer les émissions de méthane. C'est le cas de l'Impossible Burger, auquel de la léghémoglobine confère la couleur rouge typique de la viande. Il s'agit d'une protéine proche de l'hémoglobine, à l'origine présente dans les racines du soja. Pour la production industrielle, on utilise de la léghémoglobine synthétique produite au moyen de levures génétiquement modifiées, car c'est moins cher. Selon l'analyse du cycle de vie (LCA)⁷⁰ de la société de conseil Quantis, leader suisse en la matière, la fabrication de l'Impossible Burger doit permettre de réduire de 89% les émissions de gaz à effet de serre (de méthane, notamment) par rapport à la viande bovine conventionnelle.

Méthane

Pourquoi l'édition génomique n'est pas une solution

Argument 1

La composition de la flore intestinale influence l'immunité

Manipuler la flore bactérienne de l'estomac bovin n'est pas sans risque. Ces micro-organismes ayant évolué avec leur hôte pendant des millénaires, ils se sont adaptés mutuellement. Le patrimoine génétique bovin montre combien cette relation est étroite.⁷¹ Car la transmission des micro-organismes utiles à la descendance n'est pas un hasard: elle est contrôlée entre autres par des régions précises du génome bovin.^{72,73} Les micro-organismes colonisant l'intestin jouent un rôle important pour la dégradation des glucides non digérés, en plus de contribuer à l'intégrité de l'intestin. C'est ainsi que des modifications de la flore intestinale ont une grande influence sur le bien-être général et la santé des bovins.⁷⁴ Une plus grande vulnérabilité face aux maladies, par exemple, n'est pas exclue.

Il existe déjà beaucoup d'autres méthodes se passant des biotechnologies pour réduire la production de méthane.⁷⁵ La sélection classique permet entre autres - même si cela prend plus de temps - d'obtenir des races qui émettent moins de méthane. Des vaccins spécifiques empêchent les microbes méthanogènes de se développer dans le tractus intestinal. De même, des changements de fourrage, comme la distribution d'algues marines ou de certains additifs fourragers, freinent la production de méthane.

Argument 2

Le génie génétique intensifie la production agricole

L'édition génomique, mais aussi les méthodes alternatives précitées visant à diminuer la production de méthane, incitent à élever autant, voire plus de bovins dans des systèmes de production intensifs sans que cela ne fasse augmenter les émissions totales de méthane. Mais cela ne résout pas la problématique du climat. Le méthane - comme déjà évoqué - n'est en effet pas le seul gaz à effet de serre nocif émis par les élevages d'animaux. L'élevage intensif de races haute performance fait également augmenter les besoins en concentrés. Or, les cultures fourragères, caractérisées par une forte consommation d'engrais de synthèse, vont de pair avec des émissions élevées de protoxyde d'azote (cf. point 2. Protoxyde d'azote), dont l'effet de serre est plus de dix fois supérieur à celui du méthane. En outre, les changements dans l'utilisation des terres, et donc la destruction de forêts et de prairies pour la production de fourrage, libèrent d'énormes quantités de CO₂. Les besoins en surface des cultures destinées aux concentrés utilisés en Europe est déjà gigantesque - et ces cultures sont souvent délocalisées dans d'autres continents comme en Amérique du Sud. Environ la moitié des concentrés utilisés en Europe sont importés d'autres continents. Les émissions causées par le transport sont donc élevées. Des millions d'hectares de terres sont dédiés à la culture de soja GM résistant aux herbicides⁷⁶ et le développement de nouvelles variétés modifiées par édition génomique a déjà fortement progressé.⁷⁷ Ce phénomène profite non pas au climat, mais aux semenciers, aux géants de l'agrochimie et aux éleveurs de bovins, qui peuvent ainsi produire de la viande bon marché.⁷⁸

Méthane

Solutions alternatives à l'édition génomique

Alternative 1

Remplacer les fourrages concentrés par des herbages

C'est précisément la grande complexité des écobilans qui fait qu'il ne suffit pas d'adapter des aspects spécifiques dans la chaîne de production. Même si les 1,5 milliard de vaches élevées dans le monde émettent des quantités considérables de méthane, elles sont capables de valoriser une ressource significative qui resterait autrement inutilisée, à savoir l'herbe. À noter qu'environ 70 % des surfaces agricoles utiles de la planète sont dédiées aux herbages.⁷⁹ Actuellement, ceux-ci ne sont pas utilisés de manière optimale: 30 % seulement des bovins sont détenus en pâturage extensif.⁸⁰ Une pâture durable des surfaces herbagères augmenterait la fertilité des sols et leur résistance à l'érosion. Elle stimulerait la croissance racinaire et par là le stockage du dioxyde de carbone – un aspect positif pour le climat. Pour encourager ce processus, il faudrait passer de l'élevage industriel à de plus petites exploitations écologiques avec pâture extensive. Une production de lait et de viande basée sur les herbages ferait diminuer la concurrence humains-ruminants pour l'alimentation et la terre, et libérerait de précieuses surfaces arables pour des cultures de denrées destinées à l'alimentation humaine.⁸¹ Étant donné que plus de 30 % des terres arables du monde sont actuellement utilisées pour la production de fourrage, cela pourrait également mettre un terme à l'augmentation de la consommation de terres associée aux importantes émissions de CO₂.⁸²

Il y a une corrélation entre la production de méthane dans la panse des ruminants et l'intensité du système d'affouragement: les concentrés (soja, maïs, céréales) favorisent une microflore produisant davantage de méthane.⁸³ Un affouragement à base de fourrages grossiers comme l'herbe correspond mieux aux besoins de l'espèce et réduit les émissions de

méthane. De plus, on évite les émissions dues au transport du fourrage.⁸⁴

Alternative 2

Réduire la consommation de viande

C'est l'intensification de l'agriculture qui a fortement accru, au cours des dernières décennies, la disponibilité d'aliments d'origine animale, en même temps qu'elle faisait augmenter la demande en viande, en œufs et en lait comparée à celle des aliments d'origine végétale. Dans les pays émergents comme la Chine ou le Brésil, surtout, cette tendance est plus l'effet de l'évolution des revenus que de la croissance démographique.^{85,86} Sans changement des structures mondiales de production et de consommation, cette tendance va se poursuivre.

Or, les produits provenant d'animaux de stabulations gourmandes en fourrages concentrés ont une empreinte climatique importante. Pratiquement 70 % des émissions directes de gaz à effet de serre de notre alimentation sont dues aux denrées animales.⁸⁷ C'est pourquoi le moyen le plus efficace de réduire les émissions de gaz à effet de serre serait de diminuer notre consommation d'aliments d'origine animale.⁸⁸ Consommer moins de viande ménage le climat et les ressources, et c'est également bon pour la santé. Sur le plan physiologique, il vaut mieux consommer les produits de la terre tels quels plutôt que transformés en viande obtenue à partir de fourrages concentrés. Cette transformation engendre une énorme perte de calories.⁸⁹ Un changement du système ferait baisser considérablement les besoins en fourrages concentrés.

Alternative 3

Des vaches vivant plus longtemps

Les techniciens en génie génétique voudraient créer des vaches haute performance produisant en permanence le plus de lait possible.

De tels animaux sont toutefois rapidement épuisés et tombent facilement malades. Comme ils reçoivent des concentrés à hautes doses, ce qui n'est pas naturel pour l'espèce, ils vieillissent rapidement et doivent être abattus tôt, à savoir en moyenne à l'âge de 5 ans.^{83,84} Cela signifie que pendant la moitié de la vie d'une vache laitière, il faut élever un jeune pour la remplacer. La période relative durant laquelle les deux animaux émettent en même temps des gaz à effet de serre est longue. Les races locales adaptées aux fourrages grossiers et élevées dans des systèmes de production durables se dépensent moins, ce qui allonge leur durée de vie et réduit donc considérablement la fenêtre temporelle d'émissions à double.^{83,84}

Alternative 4

Une agriculture régénératrice au lieu des succédanés de viande GM

Un analyse poussée du cycle de vie effectuée par la société Quantis montre qu'il existe des alternatives ménageant davantage le climat que les succédanés de viande GM.⁹⁰ Selon cette étude, la viande de bœuf issue de l'agriculture régénératrice a un bilan carbone négatif: un kilo de bœuf piège 3,5 kg de CO₂ atmosphérique. L'exploitation familiale White Oaks Pasture (Géorgie, États-Unis), qui a été étudiée et applique ce système agricole, divise la surface de pâturage disponible de manière que chaque parcelle puisse se régénérer durant une pause prolongée (pâturage tournant). Les herbes peuvent ainsi former suffisamment de surface foliaire pour stocker du carbone dans leur système racinaire et dans le sol, par le biais de la pédofaune (faune du sol). Ces pauses compensent efficacement les émissions de méthane des ruminants au pâturage.

Protoxyde d'azote

Le problème

Le protoxyde d'azote est le plus néfaste des gaz à effet de serre.⁹¹ Son effet est presque 300 fois supérieur à celui du dioxyde de carbone et il reste plus de 100 ans dans l'atmosphère, où il contribue au réchauffement de la planète. Le protoxyde d'azote se forme lorsque des micro-organismes décomposent des composés azotés dans le sol. Selon des estimations du GIEC, l'agriculture émet environ 60 % de ce gaz.⁴⁶ En Suisse, l'agriculture est même responsable de 80 % des émissions de protoxyde d'azote.⁶⁰ La problématique est complexe, car elle touche au moins trois différents niveaux de la production agricole: l'exploitation du sol, l'élevage et la fabrication d'engrais.

Le protoxyde d'azote provenant de l'exploitation des sols

Les sols sont la principale source d'émissions agricoles de protoxyde d'azote.⁶⁰ Celui-ci se forme lors de l'épandage de fertilisants organiques et synthétiques, par la fixation biologique de l'azote atmosphérique dans certaines plantes cultivées (légumineuses) et lors de l'enfouissement de résidus de récolte dans le sol. Les sols humides et fertilisés à outrance dégagent beaucoup de protoxyde d'azote.⁶⁰ Si les plantes ont besoin d'azote pour pousser, elles sont par contre incapables d'utiliser tel quel l'azote élémentaire (N₂) présent en grandes quantités dans l'air, qu'elles doivent absorber sous forme de composé chimique (ammonium, mais aussi nitrates). La transformation de l'azote élémentaire en composés valorisables par les plantes est effectuée par des bactéries. Lors d'une exploitation intensive du sol, comme c'est le cas des monocultures de plantes GM, il faut épandre à grande échelle des engrais de synthèse azotés pour que les plantes puissent assimiler suffisamment d'azote. C'est le seul moyen de s'assurer un rendement stable avec ce système agricole intensif. La semence GM développée en

laboratoire n'est pas adaptée aux conditions naturelles variables du sol et nécessite donc une source d'azote constamment disponible. Toutefois, si les plantes n'absorbent pas la totalité des engrais épandus, l'excédent s'échappe dans l'atmosphère sous forme de protoxyde d'azote.⁸⁴

Le protoxyde d'azote provenant de l'élevage

Les grandes monocultures sont pour la plupart destinées à la production de fourrages concentrés. C'est le cas du soja, cultivé sur environ 125 millions d'hectares dans le monde.⁹² Indirectement, l'élevage industriel contribue donc largement aux émissions d'azote à l'échelle mondiale.⁸⁴ Près d'un quart des engrais de synthèse sont utilisés pour les cultures fourragères.⁴⁶ Les plantes fourragères fixatrices d'azote, et qui n'ont donc pratiquement pas besoin d'engrais, comme le soja,⁹² ne sont pas une solution, parce qu'elles ne changent rien aux nombreuses répercussions négatives du système agricole intensif. Enfin, une partie du protoxyde d'azote se forme lors de la décomposition naturelle des excréments solides produits par l'élevage.⁶⁰

Le protoxyde d'azote provenant de la fabrication d'engrais

Le prix à payer pour une forte productivité des champs est un apport de ressources élevé. Les engrais de synthèse contribuent à la production de gaz à effet de serre par leur épandage sur les champs, mais aussi par leur fabrication gourmande en énergie. Celle-ci consomme d'immenses quantités de gaz naturel – un combustible fossile non renouvelable – et représente près de la moitié de la consommation d'énergie totale de l'agriculture.⁹³ Les réserves déclinantes de gaz naturel qui font monter les prix des engrais sont un autre argument de poids contre une agriculture dépendant d'engrais de synthèse pour ses cultures d'OGM.

Protoxyde d'azote

L'édition génomique contre les émissions de protoxyde d'azote?

Le secteur agricole fait volontiers de la propagande pour les cultivars obtenus par édition génomique comme étant la solution du futur aux enjeux cultureux: grâce aux technologies génétiques, il sera possible d'augmenter la productivité avec moins d'engrais de synthèse. Diverses pistes sont évoquées: premièrement, ces plantes éditées génétiquement feront économiser des engrais parce qu'elles permettront, de par leur génétique modifiée, de resserrer encore les plantations, avec une réduction de la surface à fertiliser.

Deuxièmement, l'édition génomique permettra de créer des plantes capables de mieux assimiler l'azote du sol et de le valoriser plus efficacement. L'agriculture industrielle est également intéressée par des plantes éditées génétiquement capables de piéger directement l'azote atmosphérique à l'aide de bactéries, à la manière des légumineuses. Des projets encore plus téméraires visent à modifier la photosynthèse de certaines plantes domestiquées, comme le riz, de manière à la rendre beaucoup plus efficace et à multiplier par deux les récoltes sans apports d'engrais complémentaires.

Protoxyde d'azote

Pourquoi l'édition génomique n'est pas une solution

Vouloir juguler le métabolisme de végétaux par des manipulations génétiques n'est pas réaliste, parce que celui-ci est contrôlé par des réseaux de gènes dont l'activité dépend fortement des conditions au champ. La plupart des propriétés que l'on essaie de modifier en manipulant le génome sont déterminées par des systèmes complexes, influencés par un grand nombre de gènes. C'est pourquoi, malgré d'énormes investissements, il est pratiquement impossible de fabriquer des plantes ayant ces propriétés par l'ajout ou la modification de quelques gènes. Les généticiens n'ont d'ailleurs pu mettre aucune plante de ce type sur le marché à ce jour. L'approche systémique fait par ailleurs défaut: au lieu de prendre les problèmes à la racine, problèmes causés précisément par ce système de production alimentaire industrialisée et intéressée, et de viser un changement global vers la durabilité, les biotechnologies continuent de se focaliser sur une augmentation de la productivité et sur l'intensification.

Argument 1

Les plantes éditées génétiquement «économiques en engrais» perpétuent la production industrielle, gourmande en ressources - et ses dommages collatéraux

Les plantes éditées génétiquement qui produiraient plus avec moins d'engrais ne changent rien au système cultural. Elles contribueraient même à renforcer les cultures industrielles qui visent des rendements élevés, et où les aspects environnementaux sont jugés secondaires. Des plantes ainsi modifiées offrent une réponse monocausale à l'un des nombreux problèmes engendrés par un système monocultural: un système qui ne fournit que 30% de l'alimentation mondiale,⁹⁵ mais qui est responsable d'une bonne part des émissions issues de combustibles fossiles et qui revendique une part élevée de la consommation d'eau du secteur agricole. On dit par exemple que des arbres fruitiers et des noyers nains édité

génétiquement permettant des peuplements plus denses, devraient faire économiser de l'espace et donc des engrais.⁹⁶ Mais c'est précisément ce qui peut les rendre plus vulnérables aux maladies et aux ravageurs. Ce genre de système fait en outre diminuer la biodiversité: les insectes et les oiseaux utiles n'y trouvent plus ni gîte ni nourriture.

Argument 2

Fixation de l'azote par symbiose au moyen de l'édition génomique - une utopie

L'agriculture industrielle saluerait l'émergence de plantes éditées génétiquement qui, à la manière du trèfle, des pois ou d'autres légumineuses, coopéreraient avec des bactéries pour fixer l'azote atmosphérique et seraient ainsi capables de s'auto-alimenter en azote. Cela permettrait d'éviter de devoir se convertir à des méthodes agricoles traditionnelles plus extensives pouvant se passer d'engrais de synthèse. L'idée date de bientôt quarante ans,⁹⁷ mais elle n'a pas été concrétisée jusqu'à maintenant et les nouvelles techniques de manipulation génétique ne sont pas près de le faire. En effet, la faculté de fixer l'azote dépend d'une relation symbiotique complexe entre la plante et des bactéries colonisant ses nodules racinaires, relation qui est apparue il y a 100 millions d'années.⁹⁸ Les gènes et les voies du métabolisme qui prédisposent une plante à la symbiose n'ont été à ce jour que partiellement décryptés. Certaines plantes, comme le charme ou *Parkia speciosa*, une plante comestible appréciée en Asie, sont certes génétiquement équipées pour une symbiose avec des bactéries fixatrices d'azote (famille des rhizobiacées), mais elles n'utilisent pas cette faculté.⁹⁸ Elles pourraient théoriquement être amenées, par des manipulations génétiques, à établir cette relation symbiotique. Les principales variétés de céréales ne font toutefois pas partie des plantes ayant cette prédisposition. Les experts de l'Institut

de recherche Max-Planck considèrent extrêmement improbable que la recherche puisse rendre celles-ci capables de fixer l'azote à l'aide de rhizobiacées.⁹⁸ En l'occurrence, les projets de recherche⁹⁹ visant à décrypter la génétique de cette symbiose servent plutôt à mieux comprendre le cycle global de l'azote et sa modification avec le changement climatique.

sont financièrement pas en mesure d'acheter chaque année les coûteuses semences brevetées des multinationales du secteur agro-chimique, ce que montre l'exemple du coton.¹⁰¹ Contrairement à ce que prétend l'industrie, ces plantes ne feraient qu'accroître la dépendance à l'égard des géants du secteur agro-chimique, au détriment de la souveraineté alimentaire.

Argument 3

Riz C4: accélération de l'évolution pour une photosynthèse plus efficace - grand investissement de ressources pour peu de résultats

Il est également permis de douter du succès d'un projet de recherche international financé par Bill Gates, qui vise à doubler le rendement du riz sans engrais, uniquement par une adaptation de la photosynthèse à l'aide de techniques d'ingénierie génétique. Sous la houlette de l'Institut international de recherche sur le riz, aux Philippines, des scientifiques veulent introduire dans le riz, au moyen de ciseaux moléculaires, une forme de photosynthèse plus efficace qui fonctionne pour les plantes dites «en C4», notamment chez le maïs, l'amarante ou le millet.¹⁰⁰ Pour s'adapter à des sites secs, chauds et très ensoleillés, les plantes en C4 produisent avec moins d'eau et de nutriments beaucoup plus de biomasse, et sont donc beaucoup plus productives que les plantes ayant une photosynthèse classique en C3. Cependant, pour faire d'une plante en C3 une plante en C4, il faudrait non seulement intervenir dans les mécanismes complexes de la photosynthèse, mais aussi modifier toute l'anatomie de la feuille. Ces mécanismes résultent de longs processus évolutifs qui ne sont pas si rapidement reproductibles. Ce riz édité génétiquement est censé aider surtout les agriculteurs des pays en voie de développement à augmenter leurs rendements pour se nourrir eux-mêmes et la population croissante de la planète. Seulement voilà: les petits paysans ne

Protoxyde d'azote

Solutions alternatives

à l'édition génomique

Alternative 1

Choix de variétés et méthodes culturales agroécologiques

La sélection conventionnelle a déjà donné de bons résultats pour l'augmentation de l'efficacité de l'azote chez diverses plantes.¹⁰² Différentes études montrent par ailleurs que le rendement de l'azote est généralement plus élevé en culture biologique qu'avec les méthodes culturales conventionnelles.¹⁰³ Les légumineuses fixatrices d'azote dans les rotations, en culture principale, intermédiaire ou de couverture, sont une abondante source primaire d'azote. À l'aide des bactéries colonisant leurs nodules racinaires, elles sont capables de lier suffisamment d'azote pour remplacer la quantité d'engrais de synthèse habituelle.^{104, 105} Les approches agroécologiques ont un autre avantage: celui de réduire efficacement la fuite dans les cours d'eau des nitrates issus du surplus d'engrais azotés que les plantes n'ont pas assimilés. Les méthodes culturales écologiques extensives, durables et économes en intrants, sont en l'occurrence la clé pour résoudre la problématique de l'azote.¹⁰⁵

Alternative 2

Consommer moins de produits d'origine animale

Une consommation moindre de produits d'origine animale et un déclin correspondant des cheptels entraînent, comme pour les émissions agricoles de méthane, une diminution des émissions de protoxyde d'azote. Car s'il y a moins d'animaux, il y a moins de demande en concentrés, ce qui fait baisser les besoins en surfaces de culture intensive.¹⁰⁶

Alternative 3

Des sols sains

Les excédents d'azote peuvent être évités par l'identification des besoins des plantes en fertilisants, la prise en compte du bilan humique et l'analyse de la teneur en nutriments des engrais organiques. Des solutions alternatives peuvent être tout à fait efficaces pour diminuer les émissions de protoxyde d'azote des sols agricoles, comme le charbon végétal produit à partir de déchets organiques, qui influence favorablement le cycle de l'azote dans le sol et sert par ailleurs de puits de CO₂ en raison de sa grande stabilité dans le sol.¹⁰⁷ Les projets de recherche qui servent à mieux comprendre des facteurs tels que le climat, la température et les mécanismes qui favorisent dans le sol la formation du protoxyde d'azote,¹⁰⁸ comme en effectue par exemple le Laboratoire fédéral d'essai des matériaux et de recherche (EMPA),¹⁰⁹ sont importants pour le développement d'un système de production agricole durable, et devraient bénéficier d'un plus grand soutien.





Dioxyde de carbone

Le problème

En comparaison du méthane ou du protoxyde d'azote, la part de l'agriculture aux émissions de CO₂, le plus connu des gaz à effet de serre, est très faible.¹¹⁰ Les sols agricoles servent, selon le type d'exploitation, de source ou de puits de carbone. L'émission et la fixation se compensent, ce qui explique le bilan net plutôt bas du dioxyde de carbone: les émissions nettes des sols sont estimées à moins de 1 % des émissions anthropogènes mondiales de CO₂.¹¹¹ En Suisse aussi, l'économie forestière et l'agriculture revendiquent seulement 1,2 % des émissions totales de CO₂.¹¹² Ces chiffres ne comprennent cependant pas les émissions produites par les transports, la fabrication d'engrais, le chauffage des bâtiments agricoles et le travail mécanique du sol – les passages en tracteur, par exemple – considérées comme des émissions énergétiques. Si l'on incluait ces émissions indirectes dans le calcul, la part de l'agriculture au bilan carbone total se situerait entre 10 et 20 %.

La plus grande source d'émissions agricoles de CO₂ est la destruction de la matière organique du sol par l'exploitation: une grande partie résulte de la transformation de nouvelles surfaces pour les besoins de l'agriculture, par exemple la mise en culture des pâturages ou le drainage des zones marécageuses.^{113, 114, 115, 116} La déforestation et le brûlis des forêts tropicales libèrent également de grandes quantités de CO₂, tout comme l'utilisation d'engrais à base d'urée et le chaulage (traitement à la chaux) des sols, mais aussi le labour. Les sols riches en humus, les surfaces en herbe comme les prairies et les pâturages naturels ainsi que les forêts servent par contre de réservoirs de CO₂.

L'évolution future des émissions agricoles de dioxyde de carbone est incertaine. Selon le GIEC, la vitesse de la déforestation serait stable, voire en diminution. La pratique de plus en plus répandue de méthodes de travail ménageant le sol pourrait faire baisser les émissions ou les

stabiliser à bas niveau. Mais d'un autre côté, la production de CO₂ liée aux transports pourrait augmenter avec la croissance du commerce international de produits agricoles.¹¹⁷

Dioxyde de carbone

L'édition génomique contre les émissions de CO₂?

La transformation du gaz à effet de serre qu'est le dioxyde de carbone (CO₂) en composés organiques est un mécanisme clé dans le cycle global du carbone. Les chercheurs essaient d'atténuer les effets délétères de l'accroissement de la production agricole de CO₂ en intervenant dans le métabolisme des plantes cultivées, par exemple en rendant les arbres capables de stocker plus de carbone dans leur racines¹¹⁸ et les grandes cultures plus efficaces dans leur fonction de capteurs de CO₂.^{119, 120}

Ces solutions faisant appel à l'ingénierie génétique comportent des risques jusqu'ici méconnus pour l'environnement, et certaines sont difficilement réalisables. Elles font oublier la cause principale du problème et la recherche de stratégies susceptibles de diminuer la production de CO₂. Les stratégies naturelles et systémiques, éprouvées depuis longtemps, comme les approches agroécologiques décrites plus haut, offrent à long terme des réponses plus simples et plus sûres que des solutions technologiques immédiates à un problème créé par l'être humain. Elles ne sont par contre économiquement pas intéressantes pour le monde développé et ses groupes industriels.

Dioxyde de carbone

Pourquoi l'édition génomique n'est pas une solution

Argument 1

Des arbres GM transformés en capteurs de CO₂ - traitement des seuls symptômes, avec des risques imprévisibles

La photosynthèse permet aux arbres de puiser du CO₂ dans l'air. Ils en absorbent davantage qu'ils n'en libèrent par la respiration. Le carbone est transformé en oxygène et en biomasse. Comme le CO₂ atmosphérique est stocké longtemps dans le bois, les forêts peuvent aider efficacement à limiter le réchauffement climatique. Cependant, ce processus de stockage est très lent. Un arbre n'a fini sa croissance qu'après des décennies. C'est pourquoi les biotechnologues veulent renforcer cet effet à l'aide de nouveaux super arbres. Dans le cadre du projet Harnessing Plants, mené au Salk Institute for Biological Studies, en Californie, on travaille sur la «plante idéale», un arbre dont le génome a été modifié au moyen de ciseaux moléculaires de manière qu'il produise des racines plus denses et plus profondes.¹¹⁸ Ces racines plus robustes doivent permettre de stocker davantage de CO₂ atmosphérique, rendre les plantes plus résistantes et faire diminuer l'érosion. Une autre manipulation du génome doit empêcher la libération rapide, lors de la décomposition, du CO₂ absorbé. Pour ce faire, la plante doit être reprogrammée pour produire de la subérine, plus connue sous le nom de liège, dont la décomposition est très lente, ce qui fait que le CO₂ lié restera plus longtemps dans le sol.

L'idée est bancale sur le plan de la faisabilité, malgré les importants investissements consentis. Ce genre de modification génétique n'a été testé jusqu'à maintenant que sur l'Arabette des Dames, une herbacée. Son application aux arbres pourrait prendre encore beaucoup de temps jusqu'à l'obtention d'un arbre GM viable hors laboratoire. En outre, personne ne sait exactement combien un arbre fixe de CO₂ dans différentes conditions

environnementales. Compte tenu du changement climatique de plus en plus prononcé, une augmentation nette de l'émission de CO₂ des arbres est même possible, car leur métabolisme pourrait se modifier. Vu le long et souvent complexe cycle de vie des arbres et leurs multiples interactions avec l'environnement, il est beaucoup plus risqué de disséminer dans la nature des arbres GM que des plantes GM que l'on récolte à la fin de la période de végétation. Chez ces dernières, les risques sont évalués sur plusieurs générations dans différentes conditions environnementales. Pour les arbres, une telle analyse des risques durerait des décennies compte tenu de la lenteur de leur croissance et de leur durée de vie.

Argument 2

Nouvelles voies synthétiques de la fixation du CO₂ - trop d'incertitudes

Le cycle dit «de Calvin» utilisé par les végétaux pour fixer le CO₂ est l'une des nombreuses voies métaboliques naturelles pour la fixation du CO₂. Même si cette voie métabolique est la plus utilisée par les plantes, ce n'est pas la plus efficace. Des enzymes découvertes récemment dans des bactéries fixent le CO₂ de manière beaucoup plus rapide et fiable. Il existe actuellement des projets visant à fabriquer à partir de celles-ci, avec les outils de la biologie synthétique, des enzymes sur mesure pour construire des voies métaboliques artificielles, entièrement nouvelles et supérieures aux mécanismes naturels.^{119, 120}

Parmi les enzymes associées artificiellement dans une voie métabolique commune, certaines sont des enzymes de synthèse et d'autres proviennent de nouveaux organismes totalement différents, ce qui représente un obstacle pratiquement insurmontable. Les réactions collatérales indésirables, impliquant des métabolites avec lesquels les enzymes

ré-assemblées n'ont jamais été en contact au cours de l'évolution, sont inéluctables et ne peuvent être évitées que par d'autres manipulations du génome – avec probablement encore plus d'effets secondaires. Par ailleurs, on ne sait pas comment le cycle artificiel va s'intégrer dans le métabolisme complexe de la cellule receveuse. Il faut donc se demander si les nouvelles voies métaboliques – certes fonctionnelles en éprouvette – pourront un jour être appliquées directement à des organismes vivants.

Argument 3

Des arbres édités génétiquement contre la déforestation – production intensive comportant des risques pour l'environnement

La destruction des forêts tropicales est responsable d'un quart des émissions de CO₂ anthropogènes.^{46, 121} La déforestation est due pour une part à la fabrication de produits à base de bois, dont le papier. Les généticiens travaillant pour l'industrie du papier veulent ménager les surfaces forestières naturelles en augmentant la productivité des plantations sylvicoles. Le rendement en pâte à papier par unité de surface en serait augmenté, l'idée de base étant que plus les arbres poussent rapidement, moins ils nécessitent de surface pour produire la même quantité de papier.^{122, 123} Il faut pour cela intervenir, par exemple, dans le régime hormonal des principales essences fournissant du papier, comme l'eucalyptus ou le peuplier, pour modifier les gènes responsables de la sécrétion des hormones de croissance.^{124, 125, 126}

L'industrie est sur la mauvaise voie avec cette approche. Celle-ci détourne l'attention de solutions alternatives pour la protection des zones forestières naturelles, par exemple, de la recherche de solutions visant à faire baisser la consommation de produits à base de bois et la réutilisation du bois déjà transformé. La réalité montre qu'il existe un grand intérêt

commercial à fabriquer et à utiliser de plus en plus de produits à base de bois: les arbres édités génétiquement profitent en premier lieu à l'industrie des plantations, de la cellulose et du papier. Les effets néfastes des plantations éditées génétiquement, à savoir l'aggravation des répercussions négatives déjà connues sur les sols, les eaux et la biodiversité par cette intensification, sont passés sous silence. Car les arbres édités génétiquement consomment plus d'eau et font augmenter l'utilisation d'agrottoxines. Les semences et les pollens très mobiles des arbres constituent un risque supplémentaire: celui de la dissémination incontrôlable du matériel génétique modifié.

Dioxyde de carbone

Solutions alternatives

à l'édition génomique

Alternative 1

Gestion des terres ménageant le climat – stimuler naturellement le stockage du CO₂, préserver les réserves de CO₂ existantes dans le sol

Le rapport mondial sur l'agriculture⁸⁹ souligne l'énorme potentiel d'une gestion des terres ménageant le climat. Les terres cultivées occupent plus de la moitié de l'ensemble du territoire de l'UE. L'intensification de l'agriculture a détruit 30 à 75 % de la matière organique présente dans les sols arables et 50 % de celle dans les pâturages.¹²⁷ Avec des mesures agroécologiques qui font leurs preuves depuis des siècles,^{5,6} la teneur en humus des sols pourrait être à nouveau augmentée ; jusqu'aux deux tiers de l'excédent actuel de CO₂ dans l'atmosphère pourraient ainsi être restitués aux sols.^{127,128} Non seulement les sols riches en humus stockent plus de carbone, mais ils ont une meilleure capacité de rétention d'eau. Ils sont moins sensibles à l'érosion et plus fertiles que les sols pauvres en humus.¹²⁸ On peut améliorer la teneur en humus des sols en veillant à une couverture végétale permanente des surfaces arables et à ne jamais les laisser à nu.¹²⁹ L'abandon du labour ou le labour juste à la profondeur minimale nécessaire sont bénéfiques au sol.¹²⁷ Les émissions de CO₂ provoquées par le passage des machines sont moindres, ce qui diminue les coûts de production.^{130,131,132} C'est pourquoi le travail conservateur du sol gagne en attractivité : de plus en plus d'agriculteurs optent pour cette méthode.¹⁰⁸ L'enfouissement des résidus de récolte dans le sol réduit aussi les émissions de CO₂ qu'engendre par exemple leur incinération.

Une surface considérable de prairies permanentes a été sacrifiée aux grandes cultures, qui servent souvent à la production de fourrages. Lors de la mise en culture de prairies, une bonne partie des réserves de carbone du sol se perd sous forme de CO₂.¹³³ Comme les prairies contiennent deux fois plus de

réserves de carbone que les surfaces cultivées, la renaturation des sols dégradés et des sols tourbeux cultivés constitue une mesure complémentaire efficace.⁴⁶

Une meilleure gestion des pâturages favorisera également le stockage du carbone. Les pâturages tournants, qui permettent à la végétation de se régénérer après avoir été pâturée, contribuent à retenir plus longtemps les matières organiques et le carbone dans le sol.¹²⁹

Alternative 2

Reboisement et agroforesterie au lieu d'arbres édités génétiquement

Sans compter les surfaces occupées par l'être humain à d'autres fins (surfaces agricoles et bâties), il serait possible de restaurer 0,9 milliard d'hectares d'anciennes surfaces forestières, ce qui permettrait de neutraliser deux tiers des émissions anthropogènes de CO₂, comme le montre une étude de l'EPF Zurich.¹²¹

L'agroforesterie est une autre solution pour compenser les émissions agricoles de CO₂. Il s'agit d'une approche systémique combinant les arbres avec les grandes cultures, les prairies et/ou la détention animale sur la même parcelle. L'agroforesterie contribue à une utilisation optimale, et sans impact sur le climat, de surfaces agricoles préexistantes. Ce genre de système séquestre de grandes quantités de CO₂ dans le bois ainsi que dans le sol sous forme d'humus.¹³⁴ Ses autres avantages sont des effets bénéfiques sur l'érosion des sols, les fuites de nitrates et la biodiversité.^{135,136,137} Le bois de construction et d'ameublement utilisé comme alternative aux énergies fossiles permet de réduire les émissions de gaz à effet de serre. L'agroforesterie ne fonctionne pas seulement dans les pays en développement, où elle était initialement utilisée pour l'exploitation agricole des surfaces boisées. Une étude d'Agroscope montre qu'appliqué sur 9 % de la

surface agricole européenne, le régime d'agroforesterie permettrait de compenser 43% des émissions agricoles de gaz à effet de serre.¹³⁴ En Suisse aussi, les déficits écologiques régionaux pourraient être atténués au moyen de systèmes modernes d'agroforesterie. Ce régime permettrait d'y produire du lait et de la viande climatiquement neutres en compensant les émissions des exploitations agricoles.¹³⁵

Agroécologie

Approche plaçant la diversité au cœur des processus de production agricole. En combinant la pensée scientifique, les savoirs traditionnels et les systèmes de gestion modernes, elle préconise le passage à une agriculture à la fois durable et productrice. L'agroforesterie, la permaculture en sont des exemples.

Brevets sur les semences

En brevetant des semences génétiquement modifiées, les quelques géants de l'industrie agrochimique essaient d'étendre leur influence à la production alimentaire mondiale pour préserver leur avantage concurrentiel. Les brevets accentuent la dépendances des agriculteurs envers les multinationales de l'agrochimie.

Ciseaux moléculaires CRISPR/Cas9

Nouvelle technique d'ingénierie génétique simplifiant et accélérant la modification du génome. Elle a été découverte dans les bactéries, qui s'en servent pour se défendre contre les virus.

Concurrence pour l'utilisation de la surface

Course à la surface pour différentes utilisations agricoles. Exemple: concurrence entre les cultures destinées à l'alimentation humaine et celles destinées aux fourrages.

Édition génomique

Nouveaux procédés d'ingénierie génétique qui permettent une modification rapide et en profondeur du patrimoine génétique au travers de l'utilisation de ciseaux moléculaire du type CRISPR/Cas9 par exemple. Les risques de ces méthodes si elles sont utilisées pour l'agriculture sont largement méconnus.

Empreinte climatique

Influence de l'être humain sur le réchauffement climatique (émissions de gaz à effet de serre par les diverses activités humaines).

Engrais de synthèse

Usure du sol suite à l'enlèvement de composants solides par le vent ou l'eau, provoquant sa dégradation. Des sollicitations mécaniques comme certaines

pratiques culturales (le labourage et le surpâturage, p. ex.) favorisent l'érosion des sols.

Érosion du sol

Usure du sol suite à l'enlèvement de composants solides par le vent ou l'eau, provoquant sa dégradation. Des sollicitations mécaniques comme certaines pratiques culturales (le labourage et le surpâturage, p. ex.) favorisent l'érosion des sols.

Espèces envahissantes (ou invasives)

Espèces allogènes transportées au-delà de leurs limites de répartition naturelles, où elles peuvent menacer la biodiversité et l'agriculture en prenant le dessus sur les espèces indigènes ou en propageant des maladies.

Gène

Séquence du génome impliquée, avec d'autres séquences et avec les influences de l'environnement, dans la synthèse de protéines et l'émergence des caractères d'un organisme.

Génome

Ensemble de l'information génétique d'une cellule, appelé aussi patrimoine génétique.

Génie génétique classique

Modification du patrimoine génétique (de plantes) par l'introduction de certains gènes, provenant généralement d'autres espèces, à des endroits aléatoires du génome.

Réservoir génétique

Ensemble de toutes les variations génétiques dans une population donnée. Au fil des décennies, la sélection entraîne une diminution du réservoir génétique des espèces, alors que les nouvelles mutations et les croisements avec d'autres populations l'agrandissent.

Résilience

Faculté d'un écosystème de revenir à son état d'origine après une perturbation. Exemple: plasticité des agroécosystèmes face au stress climatique, capacité de régénération après une exposition au stress.

Labour interdit - les techniques ménageant le sol le protègent de l'érosion et du dessèchement.

Avec le changement climatique, les étés secs vont devenir plus fréquents, en Europe aussi.

Le niébé est une légumineuse orpheline, négligée à tort vu son grand potentiel.

Engrais de synthèse prêts pour le transport.

Les élevages industriels sont responsables d'une bonne partie des émissions agricoles de gaz à effet de serre.

Agriculture urbaine (Urban Farming) - une approche agro-écologique.

Les plantations d'eucalyptus sont une menace pour le niveau de la nappe phréatique, et elles nécessitent de grandes quantités d'intrants chimiques.

Le quinoa est une plante robuste qui était encore inconnue il y a dix ans et dont les graines sont maintenant proposées même par les chaînes de restauration rapide.

L'épandage de lisier libère du protoxyde d'azote.

Les monocultures de soja nécessitent des engrais de synthèse et des herbicides.

La diversité est à la base de l'agroécologie. Anciennes variétés de pomme de terre au marché.

Dans la version numérique, les informations de la liste des sources sont liées aux URL correspondantes. Cliquez ici pour le PDF: www.stopogm.ch/dossier-climat

1
FAO 2014 The state of food and agriculture - innovation in family farming. Rome.

2
Leippert F, Darmaun M, Bernoux M and Mpheshea M 2020 The potential of agroecology to build climate-resilient livelihoods and food systems. Rome. FAO and Biovision.

3
GRAIN 2009 Earth matters - Tackling the climate crisis from the ground up. In: Climate crisis special issue. S. 9-17.

4
«4 per 1000» Initiative

5
FAO 2018 The 10 Elements of Agroecology. Guiding the Transition to Sustainable Food and Agricultural Systems. Rome

6
FAO 2018 Scaling up Agroecology Initiative. Rome

7
Hari V, Rakovec O, Markonis Y, Hanel M, Rohini K 2020 Increased future occurrences of the exceptional 2018-2019 Central European drought under global warming. Scientific Reports 10, 12207.

8
Lobell DB, Schenkler W, Costa-Roberts J 2011 Climate Trends and Global Crop Production Since 1980. Science 29, 333 (6042): 616-620.

9
Jones N 2011 Climate change curbs crops. Nature News: doi:10.1038/news.2011.268

10
Collins M, Knutti R, Arblaster JM et al. 2013 Long-term Climate Change: Projections, Commitments and Irreversibility. In: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker TF, Qin D, Plattner G-K et al. (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

- 11
IPCC, 2018: Summary for Policymakers. In: Global warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty [Masson-Delmotte V, Zhai P, Pörtner HO et al. (eds.)]. World Meteorological Organization, Geneva, Switzerland, 32 pp.
- 12
FAO 2017 The impact of disasters and crises on agriculture and food security. Rome
- 13
OECD 2017 Water Risk Hotspots in Agriculture.
- 14
Oppenheimer M, Glavovic BC, Hinkel J et al. 2019 Sea Level Rise and Implications for Low-Lying Islands, Coasts and Communities. In: IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate [Pörtner H-O, Roberts DC, Masson-Delmotte V et al. (eds.)].
- 15
Haque E, Taniguchi H, Hassan MM, et al. 2018 Application of CRISPR/Cas9 Genome Editing Technology for the Improvement of Crops Cultivated in Tropical Climates: Recent Progress, Prospects, and Challenges. *Frontiers in Plant Science* 9: 617. doi: 10.3389/fpls.2018.00617
- 16
Juroszek P, Racca, P, Link S, Farhumand J, Kleinhenz B 2019 Overview on the review articles published during the past 30 years relating to the potential climate change effects on plant pathogens and crop disease risks. *Plant Pathology* 69 (2): 179-193.
- 17
Hunjan MS, Lore JS 2020 Climate Change: Impact on Plant Pathogens, Diseases, and Their Management. In: Jabran K, Florentine S, Chauhan B (eds) *Crop Protection Under Changing Climate*. Springer, Cham.
- 18
Trebicki, Finlay K 2019 Pests and Diseases under Climate Change; Its Threat to Food Security. In: *Food Security and Climate Change* Shyam Singh Yadav, Robert J. Redden, Jerry L. Hatfield, Andreas W. Ebert, Danny Hunter (eds) Food Security and Climate Change John Wiley & Sons.
- 19
Martignago D, Rico-Medina A, Blasco-Escámez D, Fontanet-Manzanque JB and Caño-Delgado AI 2020 Drought Resistance by Engineering Plant Tissue-Specific Responses. *Frontiers in Plant Science*. 10:1676. doi: 10.3389/fpls.2019.01676
- 20
Shi J, Gao H, Wang H, Lafitte HR, Archibald RL, Yang M, Hakimi SM, Mo H, Habben JE 2016 ARGOS8 variants generated by CRISPR-Cas9 improve maize grain yield under field drought stress conditions. *Plant Biotechnology Journal* 15 (2): 207-216.
- 21
Zhang A, Liu Y, Wang F, et al. 2019 Enhanced rice salinity tolerance via CRISPR/Cas9-targeted mutagenesis of the OsRR22 gene. *Molecular Breeding* 39: 47.
- 22
Mehta D, Stürchler A, Anjanappa RB Hirsch-Hoffmann M, Gruissem W, Vernderschuren H 2019 Linking CRISPR-Cas9 interference in cassava to the evolution of editing-resistant geminiviruses. *Genome Biology* 20: 80.
- 23
Rey C, Vanderschuren H 2017 Cassava Mosaic and Brown Streak Diseases: Current Perspectives and Beyond. *Annual Review of Virology* 4:429-452.
- 24
CSS, ENSSER, VDW 2019 Gene Drives. A report on their science, applications, social aspects, ethics and regulation.
- 25
Bauer-Panskus A, Bohn, T, Cotter J, Hilbeck A, Millstone E, Then C, Wallace H, Wynne B 2020 Zusammenfassender Abschlussbericht des Projektes RAGES, 2016-2019.
- 26
Gurian-Sherman D 2019 Drought-tolerant CRISPR maize? Not yet – maybe not ever. *GMWatch*.
- 27
Varoquaux N, Cole B, Gao C, et al. 2019 Transcriptomic analysis of field-droughted sorghum from seedling to maturity reveals biotic and metabolic responses. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 116 (52): 27124-27132.
- 28
Becker H 2011 Pflanzenzüchtung. Ulmer, Stuttgart.
- 29
Bundesamt für Naturschutz Deutschland (BfN) 2017 Neue Verfahren in der Gentechnik: Chancen und Risiken aus Sicht des Naturschutzes. Stand Juli 2017.
- 30
Kawall K 2019 New Possibilities on the Horizon: Genome Editing Makes the Whole Genome Accessible for Changes. *Front. Plant Sci.* 10:525. doi: 10.3389/fpls.2019.00525
- 31
Katharina Kawall 2019 Die neuen Gentechnikverfahren. Eine Bewertung aus naturwissenschaftlicher Sicht. In: *Kritischer Agrarbericht*
- 32
Fabrck JA, LeRoy DM, Unnithan GC, Yelich AJ, Carrière Y, Li X, Tabashnik BE 2020 Shared and independent genetic basis of resistance to Bt Toxin Cry2Ab in two strains of pink bollworm. *Scientific Reports* 10: 7988.
- 33
Strydom E, Erasmus A, du Plessis H, Van den Berg J 2018 Resistance status of *Busseola fusca* (Lepidoptera: Noctuidae) populations to single- and stacked-gene Bt maize in South Africa *Journal of Economic Entomology* 112 (1): 305-315.
- 34
Robinson C 2020 Push for GM cotton in Africa is «cause for alarm», says nonprofit. *GMWatch*.
- 35
Banner HJ 2019 Langfristig vitale Pflanzen gibt es nur mit genetischer Vielfalt! In: Moldenhauer H, Brockmann K, Bannier H-J, Häusling M (eds) 2019 Zukunft oder Zeitbombe? Designerpflanzen als Allheilmittel sind nicht die Lösung! Die Grünen/EFA
- 36
Garcia-Bastidas FA 2019 Panama disease in banana: spread, screen and genes. PhD thesis, Wageningen University, Wageningen, the Netherlands
- 37
Wember Q 2018 Der Dürresommer 2018 – Brennende Argumente der Gentechniklobby. *Dreschflegel e.V.*
- 38
Evans BR, Kotskiozi P, Costa-da-Silva AL et al. 2019 Transgenic *Aedes aegypti* mosquitoes transfer genes into a natural population. *Scientific Reports* 9: 13047.
- 39
Akademie der Naturwissenschaften Schweiz (SCNAT) 2020 Vielfalt ist die Quelle des Lebens: Herausforderungen und Handlungsbedarf für die Förderung der Agrobiodiversität. *Faktenblatt*.
- 40
Seibold S, Gossner MM, Simons NK, et al. 2019 Arthropod decline in grasslands and forests is associated with landscape-level drivers. *Nature* 574: 671-674.
- 41
Jörgen Beckmann 2014 Biodiversität von Kulturpflanzen. Über die Entstehung und heutige Bedeutung der Kulturpflanzenvielfalt. *ProSpecieRara Deutschland*.
- 42
Mbow C, Rosenzweig C, Barioni LG, et al. 2019 Food Security. In: *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* [Shukla PR, Skea J, Calvo Buendia E, et al. (eds.)].
- 43
Mukerjee P, Sogani R, Gurung N, Rastogi A, Swiderska K 2018 Smallholder farming systems in the Indian Himalayas: Key trends and innovations for resilience. IIED Country Report. IIED, London.
- 44
Hammer K, Diederichen A 2009 Evolution, status and perspectives for landraces in Europe. In: Veteläinen M, Negri V, Maxted N, editors. *European landraces on-farm conservation, management and use*. Bioversity Technical Bulletin No. 15. Rome, Italy: Bioversity International, 23-44.
- 45
Mercer KL, Perales HR 2010 Evolutionary response of landraces to climate change in centers of crop diversity. *Evolutionary Applications* 3 (5-6): 480-493.
- 46
Smith P, Bustamante M, Ahammad H, Clark H, Dong H, Elsiddig EA et al. 2014 Agriculture, forestry and other land use (AFOLU). In *Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Edenhofer O, Pichs-Madruga R, Sokona Y et al. (eds.) Cambridge University Press, UK and NY USA 811-922.
- 47
Galloway MacLean, K. (2010). *Advance Guard: Climate change impacts, adaptation, mitigation and indigenous peoples. A compendium of case studies*. UNU-IAS.
- 48
Parry ML, Canziani OF, Palutikof JP, van der Linden PJ and Hanson CE (eds) 2007 Indigenous knowledge for adaptation to climate change. In: *Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*.
- 49
Swiderska K, Reid H, Song Y, Li J, Mutta D, Ongugo P, Pakia M, Oros R, Barriga S 2011 The Role of Traditional Knowledge and Crop Varieties in Adaptation to Climate Change and Food Security in SW China, Bolivian Andes and coastal Kenya September. Paper prepared for the UNU-IAS workshop on Indigenous Peoples, Marginalised Populations and Climate Change: Vulnerability, Adaptation and Traditional Knowledge, Mexico.
- 50
Shukla PR, Skea J, Calvo Buendia E, Masson-Delmotte V et al. (eds.) 2019 *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*.

van Etten, de Sousa K, Aguilar A et al. 2019 Crop variety management for climate adaptation supported by citizen science. *PNAS* 116 (10): 4194-4199.

Aktion Agrar 2020 Saatgutinitiative 7: Mit vereinten Gärten.

FAO 2015 Soils help to combat and adapt to climate change by playing a key role in the carbon cycle. Viale delle Terme die Caracalla 00153

Thomas F, Baeriswyl A, Ellenberger F, Gothuey N, Hauser C, Helfenstein S, Meier A 2019 Schweizer Landwirtschaft im (Klima)wandel. Schweizer Bauernverband, Brugg.

FAO Shares of emissions

Smith P, Bustamante M, Ahammad et al. 2014: Agriculture, Forestry and Other Land Use (AFOLU). In: Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Edenhofer O, Pichs-Madruga R, Sokona Y et al. (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, UK and NY.

Shukla PR, Skea J, Slade et al. 2019 Technical Summary. Shukla PR, Skea J, Calvo Buendia E, et al. (eds.) 2019 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.

FOEN 2020 Switzerland's Greenhouse Gas Inventory 1990-2018: National Inventory Report and reporting tables (CRF). Submission of April 2020 under the United Nations Framework Convention on Climate Change and under the Kyoto Protocol. Federal Office for the Environment, Bern.

Agroscope Swiss Agricultural Greenhouse Gas Inventory

Bundesamt für Umwelt BAFU 2019 Landwirtschaft als Luftschadstoffquelle.

Zaehle S, Ciais P, Friend AD, Prieur V 2011 Carbon benefits of anthropogenic reactive nitrogen offset by nitrous oxide emissions. *Nature Geoscience* 4: 601-605.

Bannink A 2011 Methane emissions from enteric fermentation in dairy cows, 1990-2008. Bericht. Wageningen UR, Animal Sciences Group, Wageningen.

Kong Y, Xia Y, Seviour R, Forster R, McAllister TA 2013 Biodiversity and composition of methanogenic populations in the rumen of cows fed alfalfa hay or triticale straw. 2013 FEMS Microbiology Ecology 84 (2): 302-315.

Kim M, Morrison M, Yu Z 2011 Status of the phylogenetic diversity census of ruminal microbiomes. *FEMS Microbiology Ecology* 76 (1): 49-63.

Climate Technology Centre and Network. Methane Emission mitigation of ruminants.

Roehe R, Dewhurst RJ, Duthie C-A et al. 2016 Bovine host genetic variation influences rumen microbial methane production with best selection criterion for low methane emitting and efficiently feed converting hosts based on metagenomic gene abundance. *PLoS Genetics* 12 (2)

Difford GF, Plichta DR, Løvendahl P et al. 2018 Host genetics and the rumen microbiome jointly associate with methane emissions in dairy cows. *PLoS Genetics* 14 (10)

Wallace RJ, Sasson G, Garnsworthy PC et al. 2019 A heritable subset of the core rumen microbiome dictates dairy cow productivity and emissions. *Science Advances* 5 (7)

Giddings LV, Rozansky R, Hart DM 2020 Gene editing for the climate: Biological solutions for curbing greenhouse emissions. Information Technology and Innovation Foundation. Bericht.

Khan S, Loyola C, Dettling J, Hester J, Moses R 2019 Comparative environmental LCA of the Impossible Burger with conventional ground beef burger. *Quantis/Impossible Foods*.

Li F, Li C, Chen Y et al. 2019 Host genetics influence the rumen microbiota and heritable rumen microbial features associate with feed efficiency in cattle. *Microbiome* 7:92

Gonzalez-Recio O, Zubiria I, Garcia-Rodriguez A, Hurtado A, Atxaerandio R 2017 Sings of host genetic regulation in the microbiome composition in cattle. *Journal of Dairy Science* 101 (3) 2285-2292.

Roehe R, Dewhurst RJ, Duthie CA et al. 2016 Bovine host genetic variation influences rumen microbial methane production with best selection criterion for Low methane emitting and efficiently feed converting hosts based on metagenomic gene abundance. *PLoS Genetics* 2016;12 (2): e1005846.

Cammack KM, Austin KJ, Lambersson WR, Conant G, Cunningham HC 2018 Ruminant Nutrition Symposium: Tiny but mighty: the role of rumen microbes in livestock production. *Journal of Animal Science* 96: 752-770

Martin C, Morgavi DP, Doreau M 2010 Methane mitigation in ruminants: from microbe to the farm scale. *Animal* 4 (3): 351-365

Myazaki J, Bauer-Panskus A, Böhn T, Reichenbecher W, Then C 2019 Insufficient risk assessment of herbicide-tolerant genetically engineered soybeans intended for import into the EU. *Environmental Sciences Europe* 31: 92.

Application of CRISPR/Cas9-mediated gene editing for the development of herbicide-resistant plants. *Plant Biotechnology Reports* 13 (5)

Cotter J, Perls D 2019 Genetically engineered animals. From Lab to factory farm. Report. Friends of the Earth U.S.

FAO 2005 Grasslands: developments, opportunities, perspectives Ed. Reynolds SG, Frame J. Enfield (NH): FAO, Rome and Science Publishers, Inc.

Nori M, Switzer J, Crawford A 2005 Herding on the brink: towards a global survey of pastoral communities and conflict—an occasional paper from the IUCN commission on environmental, economic and social policy. International Institute for Sustainable Development

Stolze M, Weissshaidinger R, Bartel A, Schwank O, Müller A, Biedermann R 2019 Chancen der Landwirtschaft in den Alpenländern. Wege zu einer raufutterbasierten Milch- und Fleischproduktion in Österreich und der Schweiz. pp 173. Haupt Verlag, Bern.

FAO 2017 Global database of GHG emissions related to feed crops: Methodology. Version 1. Livestock Environmental Assessment and Performance Partnership. FAO, Rome, Italy.

Idel A 2009 Von Hirtennomaden und Hochleistungszucht. Nutztiere in Zeiten des Klimawandels – Konsequenzen aus dem Weltagrarbericht IAASTD. Statement, Tagung der Allianz für Tiere. Berlin.

Idel A, Beste A 2018 Technikgläubigkeit und Big-Data. Vom Mythos der klimasmarten Landwirtschaft – oder warum weniger vom Schlechten nicht gut ist. Die Grünen/Europäische Freie Allianz. Martin Häusling, MdEP, Wiesbaden

Thornton PK 2010 Livestock production: recent trends, future prospects. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London B Biological Sciences* 365: (1554): 2853-2867

OECD/FAO (2018), OECD-FAO Agricultural Outlook 2018-2027, OECD Publishing, Paris/FAO, Rome.

Noleppa S 2012 Klimawandel auf dem Teller. WWF Deutschland, Berlin

Poore J, Nemecek T 2018 Reducing food's environmental impacts through producers and consumers. *Science* 360 (6392): 987-992.

IAASTD synthesis report 2009 Agriculture at a Crossroads. International Assessment of Agricultural Knowledge, Science and Technology for Development (IAASTD). Library of Congress, ISBN 978-1-59726-550-8, 106 pp.

Thorbecke M, Dettling J 2019 Carbon footprint evaluation of regenerative grazing at white oak pastures. *Quantis*.

FAO 2017 World fertilizer trends and outlook to 2020. Summary Report. FAO, Rome.

USDA 2020 World Agricultural Production. United States Department of Agriculture.

Woods J, Williams A, Hughes JK, Black M, Murphy R 2010 Energy and the food system. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London B Biological Sciences* 365 (1554): 2991-3006.

Zhou X, Passow FH, Rudek J. 2019 Estimation of methane emissions from the U.S. ammonia fertilizer industry using a mobile sensing approach. *Elementa* 7 (1): 19.

GRAIN 2014 Hungry for Land. Small farmers feed the world with less than a quarter of all farmland. Report, pp. 22.

Hollender AC, Dardick C 2015 Molecular basis of angiosperm tree architecture. *New Phytologist* 206 (2): 541-556.

- 97
Shanmugam KT, Morandi C, Andersen K, Valentine RC 1978 Genetic Engineering with Nitrogen Fixation. In: Pye EK, Weetall HH (eds) *Enzyme Engineering*. Springer, Boston, MA.
- 98
Werner GDA, Cornwell WK, Sprent JI, Kattge J, Kiers ET 2014 A single evolutionary innovation drives the deep evolution of symbiotic N₂ fixation in angiosperms. *Nature Communications* 5: 4087.
- 99
Godfray HCJ, Beddington JR, Crute IR et al. 2010 Food Security: The Challenge of Feeding 9 Billion People. *Science* 2010 327 (5967): 812-818.
- 100
Batista-Silva W, Fonseca-Pereira P, Martins A et al. 2020 Engineering improved photosynthesis in the era of synthetic biology. *Plant Communications* 1 (2)
- 101
GRAIN 2007 Bt cotton - the facts behind the hype. *Seedling*: 18-24.
- 102
Lammerts van Bueren ET, Struik PC 2017 Diverse concepts of breeding for nitrogen use efficiency. *Agronomy for Sustainable Development* 37: 50.
- 103
Lin H, Huber JA, Gerl G, Hülsbergen K-J 2016 Nitrogen balances and nitrogen-use efficiency of different organic and conventional farming systems. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*. 105: 1-23.
- 104
Arncken C, Schmack A-K, Spiegel K et al. 2014 Leguminosen Nutzen. *Naturverträgliche Anbaumethoden aus der Praxis*. Bundesamt für Naturschutz (BfN), Bonn.
- 105
HLPE 2019 Agroecological and other innovative approaches for sustainable agriculture and food systems that enhance food security and nutrition. A report by the High Level Panel of Experts on Food Security and Nutrition of the Committee on World Food Security, Rome
- 106
Uwizeye A, de Boer IJM, Opio CI et al. 2020 Nitrogen emissions along global livestock supply chains. *Nature Food* 1: 437-446.
- 107
Hüppi R, Felber R, Neftel A, Six J, Leifeld J 2015 Effect of biochar and liming on soil nitrous oxide emissions from a temperate maize cropping system. *Soil* 1: 707-717
- 108
FAO 2017. Global database of GHG emissions related to feed crops: Methodology. Version 1. *Livestock Environmental Assessment and Performance Partnership*. FAO, Rome, Italy.
- 109
Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt 2019 Erste Feldmessungen von Lachgasisotopen. *Medienmitteilung*
- 110
Bundesamt für Landwirtschaft (BLW) 2011 Klimastrategie Landwirtschaft. Klimaschutz und Anpassung an den Klimawandel für eine nachhaltige Schweizer Land- und Ernährungswirtschaft.
- 111
Smith P, Martino D, Cai Z et al. 2007: Agriculture. In *Climate Change 2007 Mitigation. Contribution of Working Group III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* Metz B, Davidson OR, Bosch PR, Dave R, Meyer LA (eds), Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- 112
Henzen C, Angele H-C, Maerki A et al. 2012 Ressourcen- und Klimageffizienz in der Landwirtschaft: Potenzialanalyse. *AgroCleanTech*, Brugg.
- 113
Wüst-Galley C, Grüning A, Leifeld J 2015 Locating organic soils for the Swiss greenhouse gas inventory. *Agroscope Science* 26: 1-100.
- 114
Bader C, Müller M, Schulin R, Leifeld J 2018 Peat decomposability in managed organic soils in relation to land use, organic matter composition and temperature. *Biogeosciences* 15: 703-719.
- 115
Smith P 2004 Engineered biological sinks on land. In: *The Global Carbon Cycle. Integrating humans, climate, and the natural world*. Field CB, Raupach MR (eds.). SCOPE 62, Island Press, Washington D.C., 479-491.
- 116
Janzen HH 2004 Carbon cycling in earth systems - a soil science perspective. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 104: 399-417.
- 117
Metz B Davidson OR, Bosch PR, Dave R, Meyer LA (eds) 2007 Contribution of Working Group III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge UK and NY, USA. (Chapter 8).
- 118
Salk Power of Plants
- 119
Naseem M, Osmanoglu Ö, Dandekar T 2020 Synthetic rewiring of plant CO₂ sequestration galvanizes plant biomass production. *Trends in Biotechnology* 38 (4): 354-359.
- 120
Erb, T 2016 Synthetische Kohlenstoffdioxid-Fixierung. *Forschungsbericht 2016 - Max-Planck-Institut für terrestrische Mikrobiologie*.
- 121
Bastin JF, Finegold Y, Garcia C et al. 2019 The global tree restoration potential. *Science* 365 (6448): 76-79.
- 122
Mizrachi E, Mansfield SD, Myburg AA 2012 Cellulose factories: Advancing bioenergy production from forest trees. *New Phytologist* 194 (1): 54-62.
- 123
Fenning TM, Walter C, Gartland KMA 2008 Forest biotech and climate change. *Nature Biotechnology* 26: 615-617.
- 124
Busov VB 2018 Manipulation of growth and architectural characteristics in trees for increased woody biomass production. *Frontiers in Plant Sciences* 9: 1505.
- 125
Chang S, Mahon EL, MacKay HA et al. Genetic engineering of trees: progress and new horizons. In *Vitro Cellular and Developmental Biology - Plant* 54: 341-376.
- 126
Oles V, Panchenko A, Smertenko A 2017 Modeling hormonal control of cambium proliferation. *PLOS ONE* 12 (2): e0171927 10.1371/journal.pone.0171927
- 127
Milgroom J, Florin, GRAIN 2017 Agroecology getting to the root causes of climate change. *Editorial. Farming Matters* 33.1.
- 128
Nicholls CI, Altieri MA 2016 Agroecology: Principles for the conversion and redesign of farming systems. *Journal of Ecosystem and Ecography* S5:1.
- 129
Schaffnit-Chatterjee C 2011 Minderung des Klimawandels durch Landwirtschaft. Ein ungenutztes Potenzial. *Trendforschung, Aktuelle Themen* 529, Deutsche Bank Research, Frankfurt am Main.
- 130
Rodale Institute 2011 *The Farming systems trial. Celebrating 30 years*. Rodale Institute, USA.
- 131
Huang Y 2018 Greenhouse gas emissions and crop yield in no-tillage systems: A meta-analysis. *Agriculture, Ecosystems and Environment*. 268: 144-153.
- 132
Mangalassery S, Sjögersten S, Sparkes DL, Sturrock CJ, Craigan J, Mooney SJ 2014 To what extent can zero tillage lead to a reduction in greenhouse gas emissions from temperate soils? *Scientific Reports* 4: 4586.
- 133
Poeplau C, Don A, Vesterdal L et al. 2011 Temporal dynamics of soil organic carbon after land-use change in the temperate zone - carbon response functions as a model approach. *Global Change Biology* 17 (7): 2415-2427.
- 134
Kay S, Rega C, Moreno G et al. 2019 Agroforestry creates carbon sinks whilst enhancing the environment in agricultural landscapes in Europe. *Land Use Policy* 83: 581-593.
- 135
Briner S, Hartmann M, Lehmann B 2011 Sind Agroforstsysteme eine Ökonomische Möglichkeit zur CO₂-neutralen Tierproduktion? *Agrarforschung Schweiz* 2 (1): 12-19.
- 136
Jose S 2009 Agroforestry for ecosystem services and environmental benefits: an overview. *Agroforestry Systems* 76: 1-10.
- 137
Malézieux E, Crozat Y, Dupraz C et al. 2009 Mixing plant species in cropping systems: concepts, tools and models. A review. *Agronomy for Sustainable Development* 29: 43-62.





Éditeur

Alliance suisse pour une agriculture
sans génie génétique (ASGG)
2017 Boudry
077 400 70 43
info@stopogm.ch
www.stopogm.ch

Rédaction

Zsofia Hock, SAG

Traduction

Monique Muraglia
Version originale en allemand disponible à
info@gentechfrei.ch

Relecture

Kathrin Graffe DE
Margarita Voelkle FR

Création

studio bergerberg

Pour une agriculture durable,
sans OGM et sans impact climatique
L'ASGG s'engage depuis 30 ans pour
assurer aux générations futures une alimen-
tation sans OGM. Seule une agriculture
naturelle peut être durablement équitable,
diversifiée et climatiquement neutre.

Versement en faveur de

CCP 17-460200-1
StopOGM
Alliance suisse pour une agriculture
sans génie génétique
2017 Boudry
IBAN CH64 0900 0000 1746 0200 1
BIC POFICHBEXXX