

Fields (qu'il a déclinée, tout comme le prix Clay plus récemment).

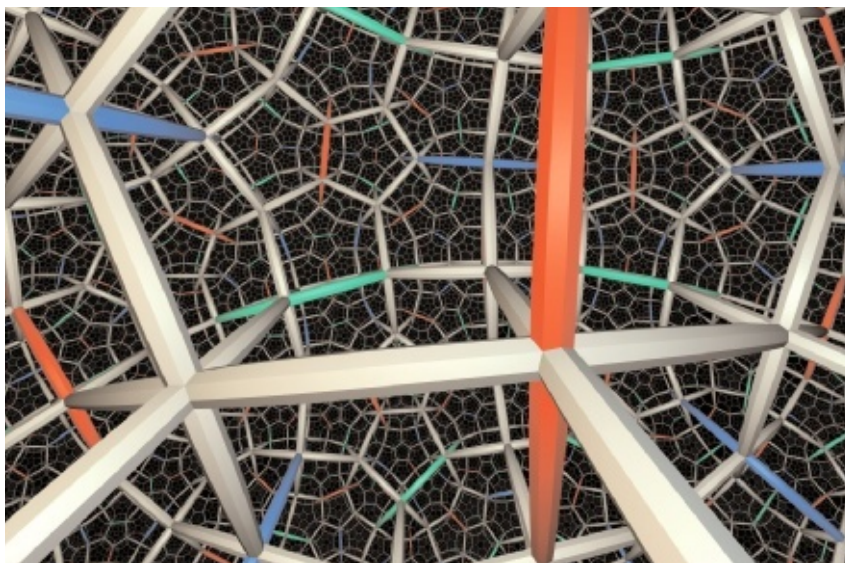
Si la géométrisation des surfaces met en jeu trois modèles – le plan euclidien, la sphère ou le disque hyperbolique –, celle des variétés de dimension 3 en fait intervenir huit. Parmi eux, citons « notre » espace ambiant euclidien et la boule hyperbolique obtenue, par analogie au disque hyperbolique, à partir d'une boule euclidienne (pleine, privée de la sphère qui l'entoure), sur laquelle on modifie le calcul des longueurs des chemins.

Les pavages réguliers de cette boule (voir la figure 7), difficiles à réaliser, permettent de construire par pliage des variétés dites hyperboliques. Ces objets, qui échappent à notre intuition, intéressent beaucoup les topologues pour leur forme complexe et leur lien avec la théorie mathématique des nœuds. En cosmologie, ils sont sources de spéculations sur la topologie de l'Univers.

Contrairement au cas des surfaces bidimensionnelles, la topologie d'une variété hyperbolique de dimension 3 détermine sa géométrie. C'est précisément l'énoncé du « théorème de rigidité » de G. Mostow : une variété hyperbolique étant donnée, il existe un unique pavage régulier de la boule hyperbolique qui permet de construire (par pliage) la variété en question.

Ce résultat de « dépliage » joue un rôle clef dans les travaux de W. Thurston et de G. Perelman. Il est à l'origine d'une école mathématique très active qui, de Yale à Jérusalem, travaille autour de ces concepts en lien avec la théorie des nombres et celle des probabilités.

Pour démontrer ce théorème, G. Mostow a fait preuve d'une grande originalité en introduisant le bord visuel de la boule hyperbolique dans son raisonnement. Dans ses grandes lignes, la démonstration consiste à partir d'un pavage régulier de la boule par un motif borné. En l'étudiant de près, on découvre que son groupe paveur contient, contrairement aux groupes paveurs euclidiens, des transformations mettant en jeu des mouvements complexes. G. Mostow les applique aux points du bord visuel de la boule hyperbolique, c'est-à-dire d'une sphère. En utilisant la présence de ces mouvements complexes sur un espace cette fois limité et de dimension 2, il parvient à montrer qu'à elle seule, cette action à l'infini détermine le pavage de départ.



Charles Gamm, Mathéon, Berlin (Allemagne)

7. L'INTÉRIEUR D'UNE BOULE HYPERBOLIQUE pavée de façon régulière par des dodécaèdres. Les couleurs n'ont pas de signification particulière dans cette représentation artistique du pavage.

Si, aujourd'hui, le théorème de rigidité de G. Mostow a perdu son éclat aux côtés d'énoncés plus généraux, l'idée de raisonner sur le bord visuel continue à vivre chez les géomètres du XXI^e siècle. Par ailleurs, sur les traces de G. Mostow et du Russe Gregori Margulis, les bords à l'infini se sont introduits dans des démonstrations d'arithmétique, grâce à la découverte de liens entre nombres et trajectoires sur des variétés illimitées. Des mathématiciens misent sur cette approche pour tenter de résoudre des conjectures de théorie des nombres.

Des bords à l'infini pour la théorie des nombres

L'une de ces conjectures, énoncée dans les années 1930 par l'Anglais John Littlewood, affirme qu'étant donnés deux nombres réels a et b , il existe des entiers p, q, r tels que la quantité $q^3(a - p/q)(b - r/q)$ soit aussi proche de zéro que l'on veut (cet énoncé porte donc sur l'approximation de a et b par des nombres rationnels). Sa formulation géométrique met en jeu un pavage régulier d'un espace de dimension 8 et un point du bord à l'infini de cet espace qui représente le couple de nombres (a, b) .

Dans ce modèle, s'intéresser à la conjecture de Littlewood revient à analyser les motifs du pavage rencontrés par une famille de géodésiques d'extrémité (a, b) . C'est ainsi

qu'avec deux collègues, le jeune Israélien Elon Lindenstrauss, lauréat d'une médaille Fields en 2010, a montré que l'ensemble des éventuelles exceptions à la conjecture de Littlewood est, sinon vide, très petit (en un sens mathématique précis). Ces travaux sont une belle illustration de la force de l'approche des bords à l'infini.

Le plan euclidien, le disque hyperbolique et leurs analogues en dimension supérieure font partie des espaces où les rayons lumineux se propagent facilement. Ce n'est pas toujours le cas. Certaines surfaces, par exemple, contiennent des trous ou des bosses qui dévient les rayons. On peut en construire une multitude par pliage de pavages réguliers du disque hyperbolique dont le motif initial est un polygone hyperbolique admettant une infinité de côtés, ou encore par recollement d'une infinité de tores.

Pour capturer l'infini d'une telle surface, l'objet adapté n'est plus le bord visuel, mais un ensemble plus abstrait, l'horobord, introduit dans les années 1980 par le mathématicien franco-russe Mikhaïl Gromov. Et depuis, d'autres notions de bord ont été inventées.

Ainsi, plus de 2000 ans après Euclide, les géomètres, partant des lois de l'optique, ont libéré les mathématiques en neutralisant l'infini, alors même que les physiciens, inspirés par des espaces géométriques abstraits, l'ont introduit dans leur représentation de l'Univers. Deux démarches qui, loin de se contredire, s'enrichissent. ■

Nourrir et préserver

Jonathan Foley

Doubler la production alimentaire d'ici 2050 tout en réduisant la dégradation de l'environnement : selon une équipe internationale, cet objectif est accessible.

L'ESSENTIEL

- ✓ Pour nourrir neuf milliards d'individus en 2050, il faudra doubler la production alimentaire.
- ✓ Or, déjà aujourd'hui, presque toutes les terres cultivables sont exploitées.
- ✓ Une équipe internationale propose un plan d'action pour doubler la production tout en réduisant son impact sur l'environnement.
- ✓ Ce plan comporte cinq mesures : améliorer la gestion des terres agricoles pour stopper leur extension, augmenter les rendements les plus faibles, mieux utiliser les engrais et l'eau, consommer moins de viande et éviter le gaspillage.

Un milliard de personnes souffrent aujourd'hui de faim chronique. Le problème ne vient pas tant de la quantité de nourriture disponible – les agriculteurs en produisent suffisamment pour répondre à leurs besoins – que de sa répartition inégale et de l'escalade des prix. En 2050, cependant, le défi aura pris une tout autre tournure.

La population mondiale aura augmenté de deux ou trois milliards, ce qui, d'après plusieurs études, devrait doubler la demande agricole. À cause de la croissance démographique, certes, mais aussi de l'augmentation du niveau de vie pour bon nombre de personnes, qui devrait entraîner une hausse de la consommation, en particulier de viande, sans oublier l'utilisation croissante de terres arables pour produire des biocarburants. Ainsi, même si l'on résout aujourd'hui les problèmes de pauvreté et d'accès aux ressources, il faudra produire deux fois plus pour assurer un approvisionnement mondial suffisant.

Et ce n'est pas tout. Parce qu'elle nécessite de défricher les forêts tropicales, de cultiver des terres en marge de zones non cultivables et d'intensifier l'industrie agroalimentaire dans des paysages et des bassins hydrographiques fragiles, l'agriculture est devenue la principale menace environnementale pour la planète. Elle occupe une grande part des terres disponibles, perturbe

des écosystèmes, consomme d'importantes ressources en eau douce, pollue les rivières et les océans et émet plus de gaz à effet de serre que la plupart des autres activités humaines. Pour préserver la planète à long terme, il devient impératif de réduire les impacts nocifs de l'agriculture.

Doubler la production en 40 ans

Le système alimentaire mondial est ainsi confronté à trois défis intriqués : nourrir les sept milliards d'individus qui peuplent la planète aujourd'hui, doubler la production d'aliments au cours des 40 prochaines années et atteindre ces deux objectifs tout en devenant une activité durable pour l'environnement. Comment répondre simultanément à ces trois défis ? Une équipe internationale d'experts, que j'ai coordonnée, propose un programme en cinq mesures qui, si elles sont appliquées conjointement, pourrait doubler la nourriture disponible pour la consommation humaine mondiale tout en réduisant les émissions de gaz à effet de serre, les pertes de biodiversité, l'utilisation de l'eau et sa pollution.

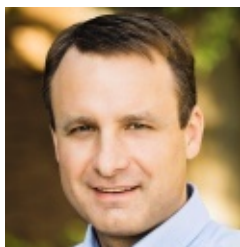
À première vue, la solution pour nourrir plus de personnes semble évidente : faire pousser plus de produits alimentaires en étendant les terres cultivées et en

LA PLANÈTE



augmentant les rendements, c'est-à-dire les quantités récoltées par hectare. Plusieurs obstacles de taille, cependant, s'y opposent.

Actuellement, 38 pour cent de la surface des continents émergés – hors Groenland et Antarctique – sont cultivés, et la plupart des terres cultivées sont les meilleures terres arables. Les terres non cultivées sont des déserts, des montagnes, de la toundra, des glaciers, des villes et des parcs, et d'autres surfaces impropres à la culture. Les quelques terres cultivables qui subsistent en frontière de ces domaines sont surtout situées dans les forêts tropicales et les savanes, qui sont vitales pour la stabilité du globe, en particulier en tant que réserves de carbone et de biodiversité. L'extension de l'agriculture sur ces zones n'est donc pas envisageable. Pourtant, au cours des 20 dernières années, cinq à dix millions d'hectares de terres cultivées ont été créés par an, dont une part importante sous les tropiques. Ces extensions n'ont toutefois agrandi la surface nette de terres cultivées que de trois pour cent, car simultanément, des villes ont recouvert des terres agricoles, en particulier dans les zones tempérées.



Jonathan FOLEY est directeur de l'Institut sur l'environnement de l'Université du Minnesota, où il est aussi titulaire de la chaire présidentielle McKnight de développement durable.

L'amélioration du rendement semble aussi une option intéressante. Cependant, notre équipe de recherche a observé que le rendement agricole global moyen n'a augmenté que d'environ 20 pour cent ces 20 dernières années, soit bien moins que ce qui est annoncé en général. Cette amélioration est importante, mais insuffisante pour doubler la production alimentaire d'ici 40 ans. Si les rendements de certaines cultures ont augmenté de façon significative, d'autres ont stagné, voire diminué.

Nourrir plus de personnes serait plus aisé si tous les produits alimentaires cultivés étaient directement destinés aux humains, mais seulement 60 pour cent des récoltes mondiales le sont : principalement des céréales, suivies des légumineuses (haricots, lentilles), de plantes oléagineu-

L'eau douce est l'une des autres « victimes ». Les hommes utilisent 4 000 kilomètres cubes d'eau par an, captée essentiellement dans des rivières et des nappes aquifères. L'irrigation représente 70 pour cent de ces prélèvements, soit 80 à 90 pour cent de l'eau consommée (l'eau qui est utilisée et qui ne retourne pas dans les bassins hydrographiques). En conséquence, le débit de nombreux grands fleuves, tel le Colorado, a diminué, certains cours d'eau se sont taris et les niveaux baissent rapidement dans de nombreuses régions, notamment aux États-Unis et en Inde.

Non seulement l'eau disparaît, mais elle est aussi contaminée. Engrais, herbicides et pesticides polluent presque tous les écosystèmes. Les flux d'azote et de phosphore dans l'environnement ont plus que doublé depuis 1960, polluant l'eau et créant d'énormes « zones mortes », privées d'oxygène, à l'embouchure de nombreux fleuves majeurs. Ironie du sort, les engrais lessivés par la pluie compromettent, au nom de l'augmentation de la production alimentaire, une autre source importante d'alimentation : la pêche côtière. Les engrais ont été un ingrédient clé de la révolution verte qui a aidé à nourrir le monde, mais on ne peut laisser la moitié des engrais appliqués être ainsi perdus.

L'agriculture est également la plus grande source humaine d'émission de gaz à effet de serre : elle représente environ 35 pour cent du dioxyde de carbone, du méthane et du protoxyde d'azote émis par les activités humaines, soit plus que les émissions liées au transport (voitures, camions et avions) ou à la production d'électricité. Une partie de ces émissions agricoles sont liées à l'énergie produite et utilisée pour cultiver, transformer et transporter les aliments, mais la plupart sont dues à la déforestation tropicale, à la production de méthane par les animaux et les rizières, et au protoxyde d'azote émis par les sols surfertilisés.

Stopper l'extension des terres agricoles

Les précédentes approches pour résoudre les problèmes alimentaires et environnementaux étaient souvent incompatibles. Produire plus en défrichant plus de terres et en utilisant plus d'eau et de produits chimiques, ou restaurer les écosystèmes en reprenant des terres arables à l'agriculture, il fallait choisir. Une autre voie qui

ses, de légumes et de fruits. Le reste est utilisé pour nourrir les animaux (35 pour cent) et cultiver des biocarburants et autres produits industriels, notamment textiles (5 pour cent).

La production de viande joue un rôle majeur dans cette répartition. Nourrir des animaux avec des produits issus de l'agriculture, même dans les systèmes de production de viande et de produits laitiers les plus efficaces, réduit considérablement la quantité de nourriture disponible pour les humains. En général, dans un tel système de production bovine, 30 kilogrammes de céréales produisent 1 kilogramme de viande de bœuf comestible, sans os.

Un autre élément empêche d'augmenter la production de nourriture : la détérioration, déjà bien avancée, de l'environnement. Seule notre consommation d'énergie, avec ses conséquences sur le climat et l'acidification des océans, rivalise avec l'ampleur croissante des impacts de l'agriculture sur l'environnement. Notre équipe de recherche estime que l'agriculture a déjà fait disparaître ou a radicalement transformé 70 pour cent des prairies du monde, 50 pour cent des savanes, 45 pour cent des forêts tempérées à feuilles caduques et 25 pour cent des forêts tropicales. L'empreinte de l'agriculture est près de 60 fois plus étendue que celle des routes et des constructions.

ON NE PEUT LAISSER LA MOITIÉ DES ENGRAIS appliqués être ainsi perdus.

Quelques chiffres

- ✓ Alors que les rendements agricoles avaient augmenté de 65 pour cent entre 1965 et 1985, ils n'ont augmenté que de 20 pour cent entre 1985 et 2005.
- ✓ En Europe et en Amérique du Nord, seuls 40 pour cent des récoltes sont destinés à la consommation humaine, contre 80 pour cent en Afrique et en Asie.
- ✓ 75 pour cent des terres agricoles, soit 3,7 milliards d'hectares, sont utilisées pour l'élevage : 350 millions d'hectares de cultures céréalières pour nourrir les animaux, et 3,38 milliards d'hectares de pâturages et de prés.
- ✓ Au cours des 50 dernières années, l'utilisation des engrais a quintuplé.
- ✓ Chaque année, cinq à dix millions d'hectares de forêt tropicale disparaissent au profit de l'agriculture.

concilierait ces deux aspects semble pourtant possible.

Après plusieurs mois de recherches et de délibérations fondées sur l'analyse de données nouvelles sur l'agriculture et l'environnement à l'échelle mondiale (estimation par satellite des surfaces cultivées, évolution des rendements en maïs entre 1985 et 2005, facteurs limitants par régions, émissions de gaz carbonique, estimation des excès d'engrais, etc.), notre équipe a établi un plan en cinq points pour traiter à la fois les défis alimentaires et environnementaux.

Notre première recommandation est de ralentir et de stopper progressivement l'extension de l'agriculture, qui se fait notamment aux dépens des forêts tropicales et des savanes. La disparition de ces écosystèmes a des conséquences importantes sur l'environnement, provoquant une perte de diversité et l'augmentation des émissions de dioxyde de carbone (dues au défrichement de terres). Le ralentissement de la déforestation réduirait considérablement les dommages environnementaux, tout en n'imposant que des

contraintes mineures sur la production alimentaire mondiale. Pour compenser la perte en capacité agricole que cela entraînerait, des mesures pourraient être prises visant à réduire l'urbanisation, la dégradation et l'abandon des terres agricoles plus productives.

De nombreuses propositions ont été faites pour réduire la déforestation. L'une des plus prometteuses est le Programme des Nations unies de réduction des émissions résultant du déboisement et de la dégradation des forêts (REDD). Dans le cadre de ce programme, en échange de crédits carbone, les nations riches payent les nations concernées pour protéger les forêts tropicales humides. D'autres programmes développent des normes de certification pour les produits agricoles, afin que les chaînes d'approvisionnement aient l'assurance que les récoltes n'ont pas été cultivées sur des terres issues de la déforestation. Par ailleurs, une meilleure politique de production des biocarburants, favorisant des cultures non alimentaires, comme celle du panic érigé, une herba-

cée dont les bilans écologique et énergétique seraient bien meilleurs que ceux du maïs, pourrait libérer des terres arables pour la production agricole alimentaire.

Remonter les plus faibles rendements

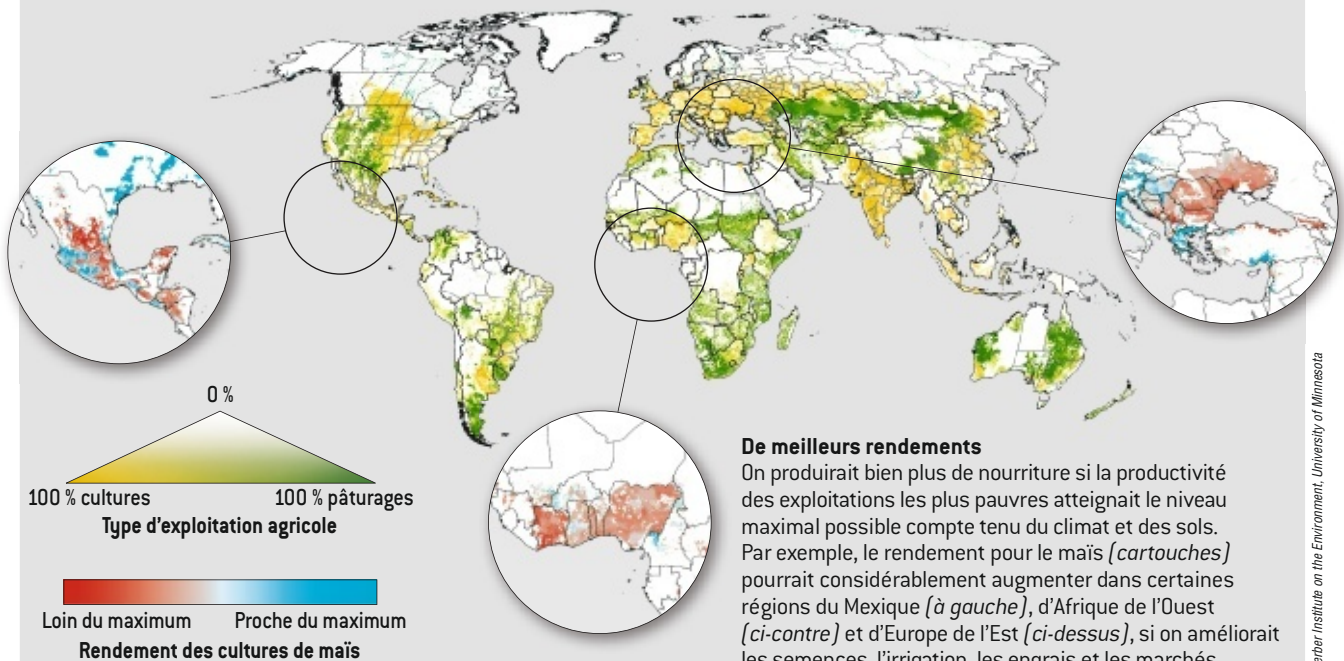
Pour doubler la production mondiale de nourriture sans étendre l'empreinte de l'agriculture, nous devons aussi augmenter les rendements des terres cultivées existantes. Il existe deux options: stimuler la productivité des meilleures exploitations, en relevant leur capacité de rendement grâce à une amélioration de la génétique des espèces cultivées et de la gestion des cultures, ou améliorer les rendements des exploitations les moins productives, afin d'utiliser tout leur potentiel. La seconde option donnerait le gain le plus important et le plus immédiat, en particulier dans les régions où la faim est la plus aiguë.

Notre équipe a analysé la répartition mondiale des rendements des cultures et a constaté que la majeure partie du globe

UNE SURFACE LIMITÉE, UN RENDEMENT AMÉLIORABLE

L'humanité exploite actuellement 38 pour cent des terres exemptes de glace de la planète. Les cultures occupent un tiers de cette surface; les pâturages et les grandes prairies naturelles pour le bétail couvrent le reste. Il y a peu de place pour éten-

dre les terres cultivées, car la plupart des terres restantes sont des déserts, des montagnes, de la toundra ou des zones urbanisées. Cependant, les exploitations de nombreuses régions agricoles pourraient être plus productives (voir les cartouches).



James Garber Institute on the Environment, University of Minnesota

présente un rendement inférieur à ses capacités. En particulier, les rendements pourraient augmenter de façon significative dans de nombreuses régions d'Afrique, d'Amérique centrale et d'Europe de l'Est, à l'aide de meilleures semences, d'engrais et d'une irrigation plus efficace. Utiliser tout le potentiel des terres cultivées les moins rentables pour 16 cultures parmi les plus importantes (maïs, pommes de terre, riz, blé, etc.) augmenterait la production alimentaire totale de 50 à 60 pour cent, avec peu de dommages pour l'environnement.

L'augmentation du rendement des terres agricoles les moins productives nécessite souvent davantage d'engrais et d'eau. Il faudra éviter une irrigation et une utilisation débridées de produits chimiques. De nombreuses autres techniques permettent d'augmenter le rendement. Des techniques de plantation avec une réduction du labour perturbent moins le sol et évitent l'érosion; des plantes dites de couverture, cul-

tivées entre les cultures alimentaires, réduisent les mauvaises herbes et apportent des nutriments et de l'azote au sol, lorsqu'elles sont enfouies au moment du labour. Des leçons tirées de systèmes biologiques et agroécologiques peuvent également être adaptées, par exemple laisser les résidus des cultures dans les champs, afin qu'ils se décomposent en nutriments.

Mieux utiliser les ressources

Le défi sera aussi économique et social. Notamment, les rendements ne pourront être augmentés qu'avec une meilleure répartition des engrais et des variétés de semences dans les régions appauvries, et un meilleur accès aux marchés mondiaux pour de nombreuses régions.

Notre troisième recommandation concerne l'efficacité des pratiques agricoles: pour réduire les impacts environnemen-

taux de l'agriculture, il est nécessaire, quel que soit le rendement, d'utiliser moins d'eau, d'engrais et d'énergie.

En moyenne, il faut environ un litre d'eau d'irrigation pour faire pousser une calorie de nourriture, bien que certains endroits en utilisent beaucoup plus. Notre analyse a montré que les exploitations peuvent limiter considérablement l'utilisation d'eau sans trop réduire la production de nourriture, en particulier sous les climats secs. Les principales stratégies sont l'irrigation au goutte-à-goutte (l'eau est appliquée à la base de la plante et non gaspillée en pulvérisations dans l'air), le paillage (couvrir le sol de matières organiques pour retenir l'humidité) et la réduction des pertes d'eau dues aux systèmes d'irrigation (en diminuant l'évaporation).

Avec les engrais, c'est un ajustement dans les deux sens qu'il faut effectuer. Certains endroits sont trop pauvres en nutriments et fournissent donc une faible

L'importance des marchés locaux

Les solutions proposées par Jonathan Foley sont intéressantes et recoupent celles développées en 2009 en France dans l'étude Agrimonde de l'INRA et du CIRAD, ou plus récemment par l'Académie des sciences. Tout le monde s'accorde à dire qu'il est impératif d'augmenter les rendements agricoles dans certains pays en développement, comme l'Afrique Subsaharienne ou l'Amérique du Sud, alors qu'en 2050 plus de la moitié de l'humanité se trouvera en Asie. Pourquoi? Parce qu'en général, les rendements sont déjà excellents en Asie, et qu'il reste peu de marges pour les augmenter dans des proportions importantes, avec les technologies connues aujourd'hui. Ce résultat est le fruit de la « révolution verte » débutée autour des années 1950, qui a remarquablement fonctionné en Asie, mais que l'on n'a pas su mettre en œuvre en Afrique. Elle consiste à utiliser des variétés sélectionnées et efficaces, et à produire plus avec trois ingrédients, des engrais, des pesticides, et de l'irrigation.

Augmenter la production et les rendements en Afrique, est-ce possible? Assurément. De vastes res-

sources y sont inexploitées (environ 20 pour cent seulement des terres cultivables sont cultivées), les ressources en eau sont immenses dans la zone tropicale. Mais c'est dans cette partie du monde que les aménagements font le plus défaut: peu de barrages, peu de périmètres irrigués, et ceux qui existent ont un fonctionnement peu satisfaisant. Un paysan africain cultive en général un hectare de terre, et le fait à la main, sans engrais, sans protection des cultures contre les attaques des parasites. Il est si pauvre qu'il n'a pas les moyens d'acheter les outils les plus élémentaires, telles une pelle ou une pioche, sans parler de semences sélectionnées, d'engrais, etc.

Dans les solutions qu'elle préconise, l'équipe de J. Foley souligne la nécessité de libéraliser le commerce mondial et les échanges internationaux. Elle ne saurait avoir à la fois aussi tort et aussi raison. Raison, car nourrir la planète en 2050 nécessitera d'énormes échanges de nourriture de continent à continent. L'Asie, avec plus de cinq milliards d'habitants, ne pourra en aucun cas être autosuffisante en produits alimentaires; quand elle aura



Plantation de canne à sucre en Afrique du Sud.

utilisé tous ses sols cultivables, construit tous les barrages et irrigué tout ce qu'elle peut, et poussé à l'extrême ses rendements, il lui manquera environ le quart de ses besoins. C'est déjà le cas aujourd'hui pour tout le Moyen-Orient et l'Afrique du Nord: 30 et 80 pour cent des produits alimentaires y sont importés. Pour ces pays, il est impératif de libéraliser les échanges, afin de réduire autant que faire se peut la facture alimentaire, et éviter la sous-nutrition.

Mais si J. Foley a globalement raison, il a localement tort. Libéraliser le commerce mondial signifie que le paysan africain cultivant à la main un hectare, avec des rendements

de l'ordre de dix quintaux, sera mis sur le même plan que le paysan européen ou américain, qui cultive seul 100 hectares de façon mécanisée, et y obtient des rendements de l'ordre de 100 quintaux. Il y a donc un facteur 1 000 entre la productivité d'un Africain et celle d'un agriculteur du Nord, sans parler des aides et subventions que le second reçoit. Les mettre en concurrence, c'est condamner sans équivoque le premier. C'est d'ailleurs ce qui se passe en ce moment, entraînant l'exode rural et l'accumulation de ces pauvres ruraux dans les bidonvilles périurbains, où ils ne trouvent pas de travail et vivent d'expédients ou d'aide.

© Shutterstock/Eric Isselée

production agricole, tandis que d'autres en sont trop riches et sont source de pollution. Les engrais ne sont presque jamais utilisés à la « bonne dose ». Notre analyse montre les points chauds sur la planète, notamment en Chine, dans le Nord de l'Inde, au centre des États-Unis et dans l'Ouest de l'Europe, où les exploitations pourraient réduire l'utilisation d'engrais sans diminuer (ou très peu) la production alimentaire : actuellement, 10 pour cent des terres arables sont à elles seules responsables de 30 à 40 pour cent de la pollution par les engrais agricoles.

Parmi les mesures envisagées figurent des politiques et des incitations économiques, tels le paiement d'une somme aux agriculteurs pour la gestion et la protection de l'eau des bassins hydrographiques, une réduction de l'utilisation excessive d'engrais, une meilleure gestion du fumier (en particulier de son stockage, afin qu'une quantité moindre ruisselle dans les bassins hydrographiques pendant un orage),

et un recyclage des nutriments en excès. La restauration de zones humides devrait aussi augmenter leur capacité à filtrer les engrais des eaux de ruissellement, et limiter ainsi la contamination de l'eau.

Enfin, là encore, une réduction du labour pourrait aider à limiter l'appau-

PRÈS DE 30 POUR CENT DE LA NOURRITURE PRODUITE est jetée, perdue, gâtée ou dévorée par des nuisibles.

vrissement du sol, tout comme l'agriculture de précision (application d'engrais et d'eau seulement quand et là où c'est nécessaire et efficace) et les techniques de culture biologique.

Nos deux dernières recommandations ont trait à la consommation. D'une part, si les récoltes servaient plus à nourrir directement les humains et moins à engraisser le bétail, on augmenterait considérablement la disponibilité mondiale de nourriture sans perturber l'environnement.

Consommer moins de viande

En moyenne, si l'on adoptait des régimes entièrement végétariens, on gagnerait jusqu'à 3×10^{15} calories supplémentaires chaque année, soit une augmentation de 50 pour cent de la production actuelle. Il est bien sûr peu probable que l'on change nos habitudes alimentaires de façon aussi drastique, pour des raisons tant économiques que sociales. Néanmoins, même de petits changements de régime alimentaire, tel le fait de remplacer le bœuf nourri aux céréales par de la volaille, du porc, ou du bœuf élevé en pâturage, peuvent être très rentables : les élevages de poulets et de porcs sont eux-mêmes plus rentables et les bovins nourris à l'herbe convertissent de la matière non alimentaire en protéines.

D'autre part, il est nécessaire de réduire le gaspillage dans le système alimentaire. Près de 30 pour cent de la nourriture produite est jetée, perdue, gâtée ou dévorée par des nuisibles. Dans les pays riches, la plupart des déchets se retrouvent en bout de chaîne, dans les poubelles des consommateurs et des restaurants. De simples changements dans notre consommation quotidienne (réduire les portions surdimensionnées, la quantité de nourriture jetée aux ordures) permettraient de limiter les pertes, mais aussi de lutter contre l'obésité.

À titre d'exemple, la construction des barrages de Manantali et de Diama, sur le fleuve Sénégal et ses affluents, achevés à la fin des années 1980, devait permettre la culture irriguée de 375 000 hectares de riz et conduire à l'autosuffisance en riz de la région. Mais la libéralisation des importations de brisures de riz provenant d'Asie a conduit à la faillite, en 1994, du Crédit Agricole Sénégalais et de l'aménagement hydraulique, et a rendu non rentable la culture du riz dans cette vallée. Ainsi, il est indispensable de maintenir, au moins pour un temps, des barrières douanières régionales pour protéger l'activité des paysans du Sud, élever peu à peu leur niveau de vie, éradiquer leur sous-nutrition, éviter l'exode rural et faire produire localement la nourriture des villages alentour.

Avec la réduction de la « volatilité » des prix agricoles, liée à la conjoncture économique mondiale et aux épisodes de sécheresse, et amplifiée par la spéculation, c'est la création de marchés locaux protégés qui permettra de relever le défi alimentaire. La technique n'est qu'une facette parmi d'autres – la démographie, la santé, les biocarburants... – de ce défi. La régulation économique en est l'aspect majeur.

Michel Griffon

CIRAD/Agence nationale de la recherche

Ghislain de Marsily

Université Paris VI/Académie des sciences

✓ BIBLIOGRAPHIE

J. A. Foley *et al.*, *Solutions for a cultivated planet*, *Nature*, vol. 478, pp. 337-342, 2011.

H. Leridon et G. de Marsily (dir.), *Démographie, climat et alimentation mondiale*, Rapport RST n°32, Académie des sciences, EDP Sciences, 2011.

S. Paillard *et al.* (coord.), *Agrimonde. Scénarios et défis pour nourrir le monde en 2050*, Quæ, 2010.

H. Ch. J. Godfray *et al.*, *Food security : the challenge of feeding 9 billion people*, *Science*, vol. 327, pp. 812-818, 2010.

R. Thurner et S. Kilman, *Enough : Why the World's Poorest Starve in an Age of Plenty*, Public Affairs, 2010.

M. Griffon, *Nourrir la planète*, Odile Jacob, 2006.



© Shutterstock/Noam Armonn

SYSTÈME D'IRRIGATION au goutte-à-goutte dans le désert africain.

✓ SUR LE WEB

Six autres cartes de données mondiales sur lesquelles la présente étude est fondée : [ScientificAmerican.com/2011/foley](http://www.inra.fr/l_institut/prospective/prospectives_menees/agrimonde)

Synthèses et vidéos sur le rapport Agrimonde : http://www.inra.fr/l_institut/prospective/prospectives_menees/agrimonde

Dans les pays plus pauvres, les pertes sont du même ordre de grandeur, mais ont lieu chez le producteur (pertes de récoltes, de stocks ruinés par des nuisibles ou d'aliments jamais livrés en raison d'infrastructures et de marchés déficients). De meilleurs systèmes d'entreposage, de réfrigération et de distribution réduisent ces déchets de façon appréciable. De meilleurs outils de commercialisation permettent aussi de mettre en relation les producteurs et les « clients », tels ces systèmes de téléphonie mobile qui, en Afrique, assurent la liaison entre fournisseurs, commerçants et acheteurs.

Bien qu'il ne soit pas réaliste d'envisager une suppression totale des déchets de la ferme à la table, des efforts ciblés, notamment pour réduire les déchets des aliments les plus consommateurs de ressources, comme la viande et les produits laitiers, pourraient faire une grande différence.

Notre stratégie en cinq points devrait permettre de faire face à de nombreux défis de sécurité alimentaire et environnementaux. Ensemble, les différentes mesures pourraient augmenter la disponibilité de nourriture à l'échelle mondiale de 100 à 180 pour cent, tout en diminuant considérablement les émissions de gaz à effet de serre, les pertes de biodiversité, l'utilisation de l'eau et sa pollution. Il est important que ces cinq points (et peut-être plus) soient mis en œuvre ensemble. Seule, aucune stratégie n'est suffisante.

Pour configurer ce nouveau système agricole responsable, prenons les meilleures idées de la révolution verte et de l'agriculture à l'échelle industrielle, d'une part, et de la culture biologique et des systèmes alimentaires locaux, d'autre part. Ce nouveau système pourrait consister en un réseau de systèmes agricoles locaux, propres au climat, aux ressources en eau, aux écosystèmes et à la culture de chaque région, reliés par des moyens efficaces de commerce international et de transport. Un tel système pourrait être pérenne et permettre aux agriculteurs de gagner leur vie.

Vers un système alimentaire en réseau

Un des dispositifs de soutien de ce nouveau système alimentaire pourrait être l'équivalent du programme LEED (*Leadership in Energy and Environmental Design*), système nord-américain de standardisation pour la construction de bâtiments à haute qualité environnementale. Ce programme attribue des niveaux de certification aux bâtiments en fonction des options vertes intégrées : énergie solaire, éclairage économique, matériaux de construction recyclés, chantiers limitant les déchets de construction... De même, pour une agriculture durable, des points pourraient être attribués aux aliments en fonction de leur valeur nutritionnelle, de la sécurité alimentaire et d'autres bénéfices pour le public, ainsi que de leurs coûts environnementaux et sociaux. Cette certification donnerait des informations plus précises que les labels alimentaires actuels, tels «local» ou «biologique», qui n'apprennent en réalité pas grand-chose sur ce que nous mangeons. Le consommateur aurait ainsi une idée des performances globales de ses aliments, au travers de dimensions nutritionnelles, sociales et environnementales, et pourrait évaluer les coûts et bénéfices de différentes méthodes agricoles.

Les principes et pratiques de nos différents systèmes agricoles (commerciaux de grande échelle, locaux et biologiques) fournissent les fondements pour répondre aux besoins de sécurité alimentaire et environnementaux du monde. Nourrir durablement neuf milliards de personnes sera l'un des plus grands défis de notre civilisation. La façon dont nous le relèverons déterminera son sort. ■

Rendez-vous sur www.pourlascience.fr

- Retrouvez gratuitement les actualités scientifiques quotidiennes.
- Recevez nos lettres d'information et réagissez aux articles en vous inscrivant sur www.pourlascience.fr/newsletters.php.
- Recherchez et commandez les archives parues depuis 2004 de *Pour la Science* et des *Dossiers Pour la Science*.
- Accédez aux numéros numériques compris dans votre abonnement en créant votre compte.
- Suivez notre actualité en direct



<http://www.pourlascience.fr/rss>



<http://twitter.com/pourlascience>



<http://www.pourlascience.fr/pls-facebook>



À très bientôt sur www.pourlascience.fr !

POUR LA
SCIENCE.fr

Le site de référence de l'actualité scientifique internationale