

Stratégies pour nourrir le monde plus durablement grâce à l'agriculture biologique

Adrian Muller^{1,2}, Christian Schader¹, Nadia El-Hage Scialabba³, Judith Brüggemann¹, Anne Isensee¹, Karl-Heinz Erb⁴, Pete Smith⁵, Peter Klocke^{1,6}, Florian Leiber¹, Matthias Stolze¹ & Urs Niggli

¹ Institut de recherche de l'agriculture biologique (FiBL), Ackerstrasse 113, 5070 Frick, Suisse. ² Institut des décisions environnementales, Département de la science des systèmes environnementaux, ETH Zürich, 8092 Zürich, Suisse. ³ Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture (FAO), Viale Terme di Caracalla, 00153 Rome, Italie. ⁴ Institut d'écologie sociale de Vienne (SEC), Université Alpen-Adria Klagenfurt-Vienne-Graz, Schottenfeldgasse 29, 1070 Vienne, Autriche. ⁵ Institut des sciences biologiques et environnementales, Université d'Aberdeen, 23 St Machar Drive, AB24 3UU Aberdeen, Royaume-Uni. ⁶ bovicare GmbH, Hermannswerder Haus 14, 14473 Potsdam, Allemagne. Toute correspondance et demande de matériel doivent être adressées à A.M. (email: adrian.mueller@fibl.org)

Traduit avec www.DeepL.com/Translator (version gratuite)

L'agriculture biologique est proposée comme une approche prometteuse pour parvenir à des systèmes alimentaires durables, mais sa faisabilité est également contestée. Nous utilisons un modèle de systèmes alimentaires qui tient compte des caractéristiques agronomiques de l'agriculture biologique pour analyser le rôle que cette dernière pourrait jouer dans les systèmes alimentaires durables. Nous montrons ici qu'une conversion totale à l'agriculture biologique nécessite plus de terres que l'agriculture conventionnelle, mais réduit les excédents d'azote et l'utilisation de pesticides. Cependant, en combinaison avec la réduction du gaspillage alimentaire et des aliments concurrents des terres arables, avec une réduction correspondante de la production et de la consommation de produits d'origine animale, l'utilisation des terres en agriculture biologique reste inférieure au scénario de référence. D'autres indicateurs tels que les émissions de gaz à effet de serre s'améliorent également, mais l'approvisionnement adéquat en azote reste difficile. En plus de se concentrer sur la production, les systèmes alimentaires durables doivent prendre en compte les déchets, les interdépendances entre les cultures, l'herbe et le bétail et la consommation humaine. Aucune des stratégies correspondantes ne nécessite une mise en œuvre complète et leur mise en œuvre partielle combinée permet d'assurer un avenir alimentaire plus durable.

L'intensification de l'agriculture a considérablement augmenté les disponibilités alimentaires au cours des dernières décennies. Toutefois, cette évolution a eu des effets négatifs considérables sur l'environnement, tels que l'augmentation de la surabondance d'azote réactif, l'eutrophisation des terres et des eaux, les émissions de gaz à effet de serre (GES) et la perte de biodiversité¹⁻⁶. Il est communément admis que d'ici 2050, la production agricole devra encore augmenter de 50 % pour nourrir la population mondiale prévue de plus de 9 milliards d'habitants⁷. Ce défi est encore exacerbé par l'évolution des habitudes alimentaires. Il est donc crucial de réduire les effets négatifs de l'agriculture sur l'environnement, tout en veillant à ce que la même quantité de nourriture puisse être fournie. Il existe de nombreuses propositions pour atteindre cet objectif, comme l'amélioration de l'efficacité de la production et de l'utilisation des ressources, l'adoption d'approches holistiques telles que l'agroécologie et la production biologique, ou la réduction de la consommation de produits animaux et du gaspillage alimentaire⁸⁻¹¹.

L'agriculture biologique est une proposition concrète, mais controversée, pour améliorer la durabilité des systèmes alimentaires. Elle s'abstient d'utiliser des engrais et des pesticides synthétiques, favorise les rotations de cultures et se concentre sur la fertilité des sols et les cycles fermés des nutriments^{4,12}. Les résultats positifs de l'agriculture biologique, mesurés à l'aune d'une série d'indicateurs environnementaux, ont été largement rapportés¹³⁻¹⁶. Cependant, les systèmes biologiques produisent des rendements plus faibles¹⁷ et nécessitent donc des surfaces plus importantes pour produire le même rendement que les systèmes de production conventionnels. En conséquence, les avantages environnementaux de l'agriculture biologique sont moins prononcés, voire inexistants, s'ils sont mesurés par unité de produit que par unité de surface^{14,18}. En outre, l'abandon des engrais azotés synthétiques pourrait entraîner un manque d'éléments nutritifs, même avec une augmentation des cultures de légumineuses¹⁹. En conséquence, la capacité de l'agriculture biologique à nourrir le monde de manière durable a été remise en question^{19,20}. Certains auteurs contribuent à la discussion sur les rendements plus faibles en agriculture biologique en tenant compte de la disponibilité des éléments nutritifs, mais aucun d'entre eux ne fournit une analyse solide de la disponibilité des éléments nutritifs dans les systèmes de production biologique¹⁹⁻²¹. En outre, ces études

n'adoptent pas une approche détaillée des systèmes alimentaires et n'abordent pas le rôle que peuvent jouer les régimes d'alimentation des animaux, les tendances de la consommation et le gaspillage alimentaire (c'est-à-dire les pertes de nourriture et les déchets), tous ces facteurs représentent des facteurs pour des stratégies qui pourraient réduire considérablement la demande de terres, tout en atténuant les impacts environnementaux et en contribuant à la disponibilité alimentaire mondiale 2,10,22-26.

Nous comblons cette lacune en adoptant une approche systémique de l'alimentation qui va au-delà de la production, des rendements et des impacts environnementaux par unité de production de produits de base spécifiques. Nous complétons ensuite ce scénario de conversion à l'agriculture biologique par deux autres modifications du système alimentaire, à savoir (a) la réduction de l'alimentation du bétail provenant des terres arables (c'est-à-dire des aliments en concurrence avec les aliments), avec les réductions correspondantes du nombre d'animaux et de la production de produits (et donc de la consommation humaine), ainsi que de l'utilisation des ressources naturelles et des impacts environnementaux qui en découlent^{25,26} ; et (b) la réduction du gaspillage alimentaire, avec les niveaux de production et les impacts correspondants¹⁰. Notre principale question de recherche est de savoir si la production d'une certaine quantité totale d'aliments, en termes de protéines et de calories, par l'agriculture biologique entraînerait des impacts plus élevés ou plus faibles que la production de la même quantité d'aliments par l'agriculture conventionnelle. Nous évaluons ensuite si, et dans quelle mesure, la combinaison de l'agriculture biologique avec les deux autres stratégies mentionnées ci-dessus peut contribuer à atténuer les effets négatifs potentiels d'une conversion à la production biologique. Nous évaluons ainsi les contextes en termes de changements complémentaires du système alimentaire dans lesquels une conversion à l'agriculture biologique peut contribuer à des systèmes alimentaires plus durables.

Malgré l'existence d'un certain nombre de modèles mondiaux permettant d'évaluer divers aspects de la production et de la consommation alimentaires, peu d'entre eux sont en mesure de prendre en compte la production biologique^{22,27} et, jusqu'à présent, aucun n'a permis de saisir les principales caractéristiques agronomiques de l'agriculture biologique de manière systématique. Nous appliquons le modèle SOL²⁶ qui est capable de simuler des aspects importants de l'agriculture biologique, tels que l'augmentation de la part des légumineuses, l'absence d'engrais de synthèse, la baisse des rendements (le "déficit de rendement") et l'utilisation moindre de composants alimentaires concurrents, comme les légumineuses à grains ou les céréales. Le modèle SOL est un modèle de flux de masse du système alimentaire mondial, qui est conçu pour couvrir les aspects physiques et biologiques au niveau national pour un grand nombre de produits de base, permettant ainsi d'évaluer et de comparer la viabilité physique et les impacts de différents scénarios.

Scénarios : parts en pourcentage dans la production biologique (référence : 0% biologique)

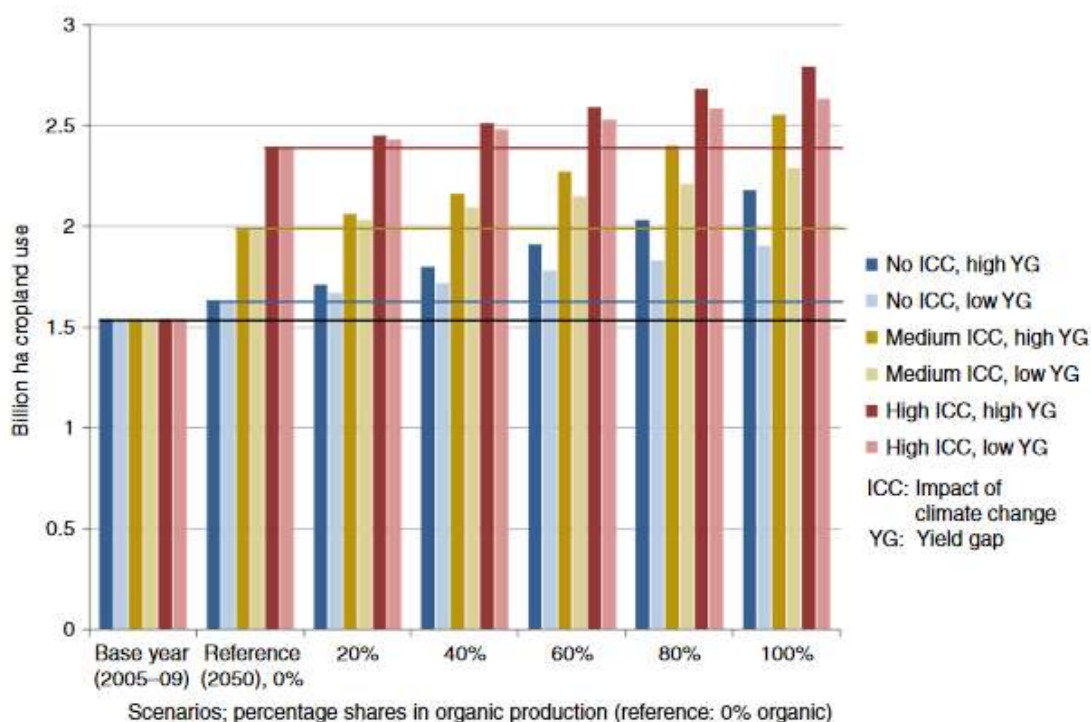


Fig. 1 Occupation des terres cultivées. Occupation des terres cultivées (milliards d'hectares) pour l'année de référence (moyenne 2005-

09), le scénario de référence 2050 (0% de production biologique) et les scénarios avec des pourcentages croissants de production biologique. Affiche les scénarios avec des écarts de rendement faibles et élevés 17,21 sans, avec des impacts moyens et complets du changement climatique sur les rendements (ICC nul/moyen/élevé).

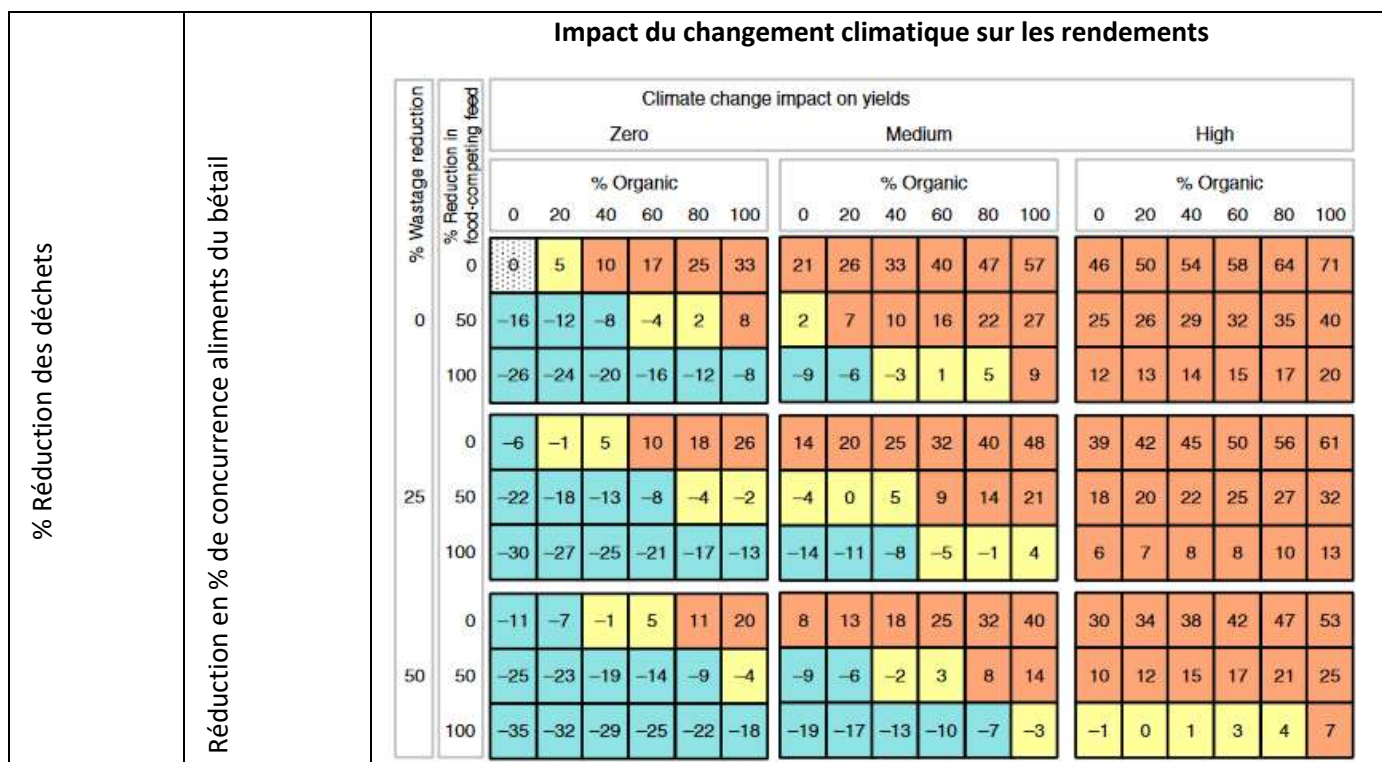


Fig. 2 Variation de la superficie des terres cultivées. Variation en pourcentage des superficies cultivées par rapport au scénario de référence. Les scénarios diffèrent en ce qui concerne : la part de l'agriculture biologique (0-100%), les effets du changement climatique sur les rendements (faibles, moyens, élevés), la réduction des aliments concurrents (0, 50, 100% de réduction par rapport aux niveaux du scénario de référence), et la réduction du gaspillage (0, 25, 50% par rapport au scénario de référence). Code couleur pour la comparaison avec la valeur du scénario de référence (c'est-à-dire 0 % d'agriculture biologique, aucun changement dans l'alimentation du bétail et le gaspillage alimentaire, gris pointillé) : >+5 % : rouge, <-5 % : bleu, entre -5 % et +5 % : jaune ; dans le scénario de référence, les superficies cultivées sont supérieures de 6 % à celles du scénario de référence actuel.

Le modèle SOL ne couvre pas explicitement les décisions des agriculteurs et des consommateurs, ni les effets de prix et de marché dans un sens éco-nomique. L'objectif est plutôt d'examiner les espaces d'option offerts par la combinaison d'un certain nombre de stratégies au niveau du système alimentaire pour une durabilité accrue, et d'évaluer le potentiel et la contribution de ces stratégies, et de leurs combinaisons, à une durabilité accrue des systèmes alimentaires. Nos résultats montrent que l'adoption de l'agriculture biologique en soi augmente la demande en terres par rapport à la production conventionnelle, mais qu'elle présente des avantages en termes d'autres indicateurs, tels que la réduction de l'excédent d'azote et l'utilisation de pesticides. Mais lorsqu'elle est associée à des changements complémentaires dans le système alimentaire mondial, à savoir la modification des rations alimentaires, la réduction correspondante du nombre d'animaux et la modification des modes de gaspillage, l'agriculture biologique peut contribuer à nourrir plus de 9 milliards de personnes en 2050, et ce de manière durable. Une telle combinaison de stratégies peut assurer une disponibilité alimentaire mondiale adéquate, avec des résultats positifs pour tous les indicateurs environnementaux évalués, y compris la superficie des terres cultivées.

Notre analyse montre les changements nécessaires dans le système alimentaire au niveau mondial, mais nous insistons sur le fait que les changements structurels dans le système alimentaire et les voies qui mènent à l'augmentation de la proportion d'aliments issus de l'agriculture biologique seront différents selon les régions, de sorte que les caractéristiques locales et régionales doivent être prises en compte.

Résultats :

Faisabilité de l'agriculture biologique. Par rapport à l'année de référence (calculée en utilisant la moyenne des données de 2005-2009 ; section Méthodes), l'occupation des terres cultivées augmente de 6 % dans le scénario de référence de 2050 (qui décrit l'agriculture telle qu'elle est prévue par la FAO, en adoptant ses hypothèses sur

l'augmentation des rendements, l'intensité des cultures et l'évolution des régimes alimentaires régionaux, et, implicitement, par le biais de sa structure de production et de consommation, sur les élasticités sous-jacentes)7. Le passage à une production 100 % biologique entraîne une nouvelle augmentation de l'utilisation des terres : 16 à 33 %, pour les écarts de rendement faibles (rendements biologiques inférieurs de 8 % en moyenne) aux écarts de rendement élevés (inférieurs de 25 % en moyenne), comme indiqué dans la littérature17,21. L'occupation des terres augmente encore si l'on tient compte des effets négatifs du changement climatique (CC) sur les rendements (modélisés par des augmentations réduites des rendements jusqu'en 2050, jusqu'à des augmentations nulles pour les impacts importants du CC) (jusqu'à +55 % pour le zéro biologique, 71-81 % pour le 100 % biologique, par rapport à l'année de référence ; figure 1). Les différences d'occupation des terres entre les scénarios avec des écarts de rendement faibles et élevés en agriculture biologique diminuent avec l'augmentation de l'impact du CC, car les différences absolues de rendement dues à l'écart de rendement diminuent avec l'augmentation de l'impact du CC et donc des rendements généralement plus faibles. La déforestation présente des tendances similaires à celles de l'occupation des sols, avec des valeurs de 8 à 15 % plus élevées pour les cultures 100 % biologiques par rapport à la référence en 2050, selon les hypothèses d'écart de rendement faibles ou élevés (figure 9 supplémentaire). La déforestation est modélisée comme la pression exercée sur les forêts par l'augmentation de la demande de terres, en supposant les mêmes taux de déforestation relatifs, c'est-à-dire le nombre d'hectares déboisés par hectare cultivé, dans chaque pays, comme indiqué dans le scénario de référence (en utilisant les données sur la déforestation de FAOSTAT ; section Méthodes). Cela sous-estime probablement les impacts de la déforestation pour les augmentations de terres cultivées plus importantes, étant donné que les terres cultivées supplémentaires proviendront en grande partie des forêts, les prairies étant supposées rester constantes. Ainsi, les indicateurs d'occupation des sols et de déforestation utilisés ici servent à évaluer la pression exercée sur les zones terrestres et les forêts qui peut résulter des dynamiques décrites dans les différents scénarios.

Nous avons modélisé des scénarios qui combinent la conversion à la production biologique avec d'autres interventions systématiques, à savoir la réduction des aliments pour animaux cultivés sur des terres arables et une réduction correspondante du nombre d'animaux et de la production 26 , et la réduction du gaspillage alimentaire.

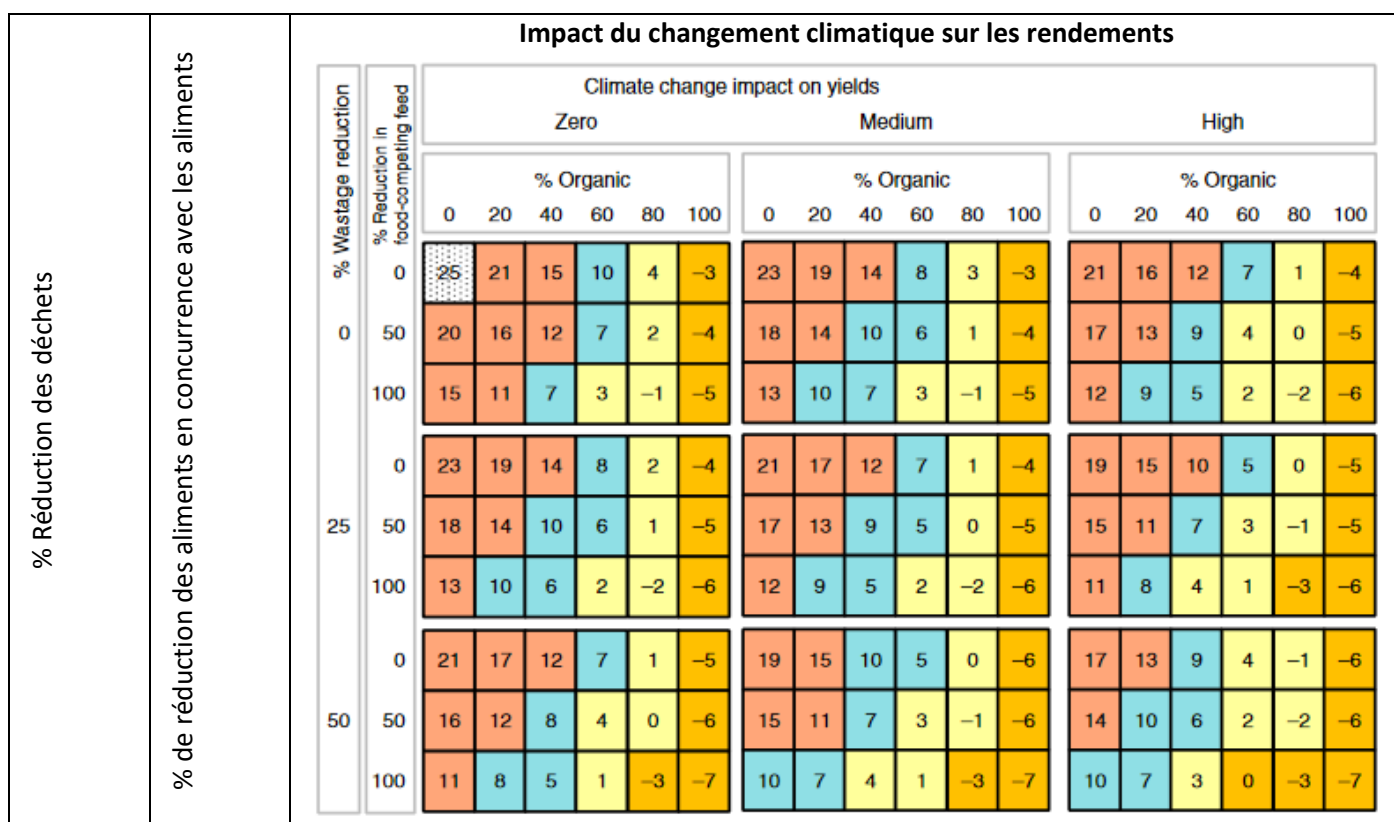


Fig. 3 Bilan azoté. Excédent (valeurs positives) ou déficit (valeurs négatives) de N en kg N/ha. Les scénarios diffèrent en ce qui concerne : les parts de l'agriculture biologique (0-100%), les impacts du changement climatique (faibles, moyens, élevés), les réductions des aliments concurrents (0, 50, 100% de réduction par rapport aux niveaux du scénario de référence), et la réduction du gaspillage (0,25, 50% par rapport au scénario de référence). Code couleur pour la comparaison avec la valeur du scénario de référence (c'est-à-dire 0 % d'agriculture biologique, aucun changement dans l'alimentation du bétail et le gaspillage alimentaire, gris pointillé) : >10 kg/ha : rouge

(non durable), entre 10 kg/ha et 5 kg/ha bleu (optimal, réduction de 60-80 % de l'excédent moyen actuel, 59,60), entre 5 kg/ha et -2 kg/ha jaune (critique, plutôt faible), < -2 kg/ha orange (déficit)

En tant que mesure autonome, une conversion de moins de 20 % à la production biologique serait possible si l'on veut éviter une augmentation de la demande de terres supérieure à 5 % de la demande de terres dans le scénario de référence (hypothèse d'absence d'incidences de la CC (ICC)), et une conversion à 100 % de la production biologique sans mesures complémentaires entraînerait une augmentation considérable de la demande de terres. En raison de l'écart de rendement, la production entièrement conventionnelle nécessitera toujours moins de terres que si une partie de la production est biologique, mais cela est moins important, en termes de durabilité globale, si les mesures complémentaires sont mises en œuvre. Une conversion partielle à la production biologique (par exemple, 40 % avec une réduction de 100 % des composants de l'alimentation animale concourant à la production de denrées alimentaires ; hypothèse d'un CPI moyen) et, dans certains cas, une conversion totale (par exemple, avec une réduction de 50 % des déchets alimentaires et une réduction de 100 % des composants de l'alimentation animale concourant à la production de denrées alimentaires ; CPI moyen), deviennent viables, avec une demande de terres égale ou même réduite par rapport au scénario de référence (figure 2). De même, bien que la demande de terres soit plus faible avec une agriculture biologique nulle, les systèmes de production avec une part positive d'agriculture biologique sont plus performants en ce qui concerne un certain nombre d'autres indicateurs environnementaux (figures 3 et 5 ci-dessous). Afin de fournir une analyse prudente du potentiel de l'agriculture biologique, ces résultats sont basés sur des écarts de rendement supposés élevés pour l'agriculture biologique¹⁷. Les résultats concernant les faibles écarts de rendement et l'impact plus faible des CC sur les rendements pour la production biologique que pour la production conventionnelle (section Méthodes) sont fournis dans les figures supplémentaires 1 à 15. Nous insistons sur le fait que les superficies de pâturages restent constantes dans tous les scénarios, mais que le nombre d'animaux et la production animale diminuent en réponse à la réduction de l'offre d'aliments concurrents, et que la demande de plantes cultivées diminue en conséquence car elles ne sont plus utilisées pour la production d'aliments. La consommation de produits d'origine animale diminue également en raison de la réduction de la production.

L'excédent d'azote est un indicateur de l'offre excédentaire d'azote réactif dans les écosystèmes et des effets connexes. Il est égal aux entrées d'azote moins les sorties d'azote, et couvre tous les flux d'azote, y compris les entrées d'engrais et la fixation biologique, ainsi que les sorties de produits, les émissions et le lessivage (section Méthodes). En raison des apports d'azote provenant de la réduction des engrais minéraux et de leur substitution par des parts accrues de légumineuses, l'excédent d'azote diminue avec l'augmentation de la part de la production biologique, et atteint un niveau équilibré à une part biologique de 80 %. Il passe à un déficit de 15 à 35 % par rapport à l'année de référence avec une conversion à 100 % (Fig.3). Cette réduction de l'excédent d'azote doit être considérée dans le contexte de l'origine des éléments nutritifs et de la façon dont ils sont recyclés en agriculture biologique : Le fumier de ferme, les résidus de culture (p. ex. racines, litière, compost) et la fixation de l'azote (par les légumineuses dans la rotation des cultures) sont les seules sources d'azote dans les systèmes biologiques des scénarios, car les engrais azotés synthétiques sont interdits et les déchets alimentaires et humains ne sont pas utilisés comme engrais dans le modèle, et ne sont pas répandus dans la réalité.

La conversion à l'agriculture biologique réduit donc la contribution de l'agriculture à la perturbation du cycle de l'azote. Toutefois, pour les taux élevés de conversion à l'agriculture biologique à l'échelle mondiale, l'approvisionnement en azote risque de devenir difficile, même si la part des aliments concurrents et des déchets est réduite (figure 3). Des mesures supplémentaires sont donc nécessaires pour assurer un approvisionnement adéquat en azote sur les terres cultivées, notamment l'optimisation de la gestion des légumineuses, le recyclage des éléments nutritifs provenant de divers déchets organiques et l'augmentation de l'efficacité de l'utilisation des éléments nutritifs. Il convient de noter que l'utilisation des déchets alimentaires et humains, en particulier, offre des possibilités supplémentaires considérables d'accroître l'approvisionnement en azote²⁸⁻³⁰, mais qu'elle n'a pas été modélisée dans le SOLm. Dans d'autres études, l'approvisionnement en azote a été évalué sur la base d'hypothèses optimistes concernant les taux de fixation de l'azote et le potentiel des cultures de couverture hors saison pour les légumineuses²¹, ce qui a été contesté^{19,20}.

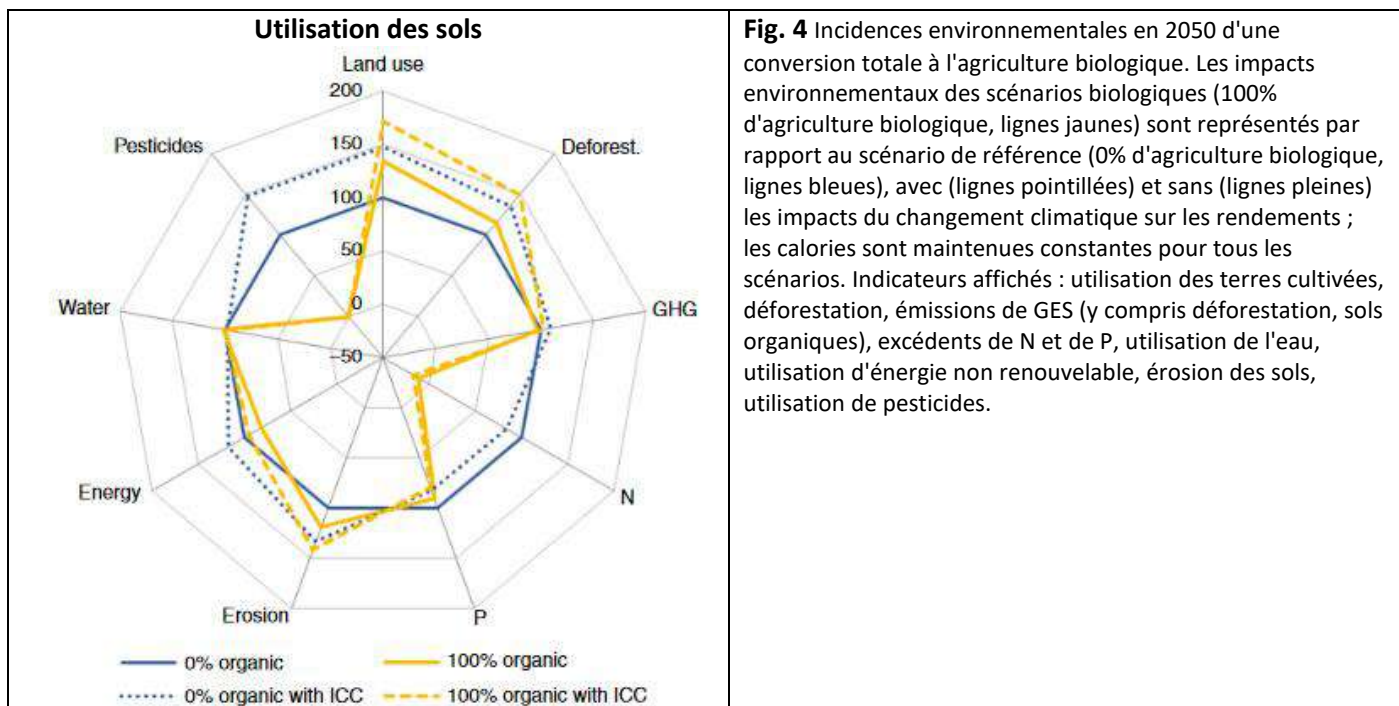


Fig. 4 Incidences environnementales en 2050 d'une conversion totale à l'agriculture biologique. Les impacts environnementaux des scénarios biologiques (100% d'agriculture biologique, lignes jaunes) sont représentés par rapport au scénario de référence (0% d'agriculture biologique, lignes bleues), avec (lignes pointillées) et sans (lignes pleines) les impacts du changement climatique sur les rendements ; les calories sont maintenues constantes pour tous les scénarios. Indicateurs affichés : utilisation des terres cultivées, déforestation, émissions de GES (y compris déforestation, sols organiques), excédents de N et de P, utilisation de l'eau, utilisation d'énergie non renouvelable, érosion des sols, utilisation de pesticides.

Nous insistons également sur le fait que les valeurs d'excédent de N présentées ici sont des moyennes mondiales par hectare, y compris pour les prairies. Elles occultent donc les variations régionales et ne sont adéquates que comme indicateur des impacts sur le cycle global des nutriments et non pour évaluer l'approvisionnement local en nutriments. En outre, le dépôt de N atmosphérique n'est pas inclus²⁸. Dans l'ensemble, les résultats montrent que, par exemple, un système alimentaire combinant 60 % de production biologique, 50 % d'aliments en concurrence avec d'autres aliments et 50 % de gaspillage alimentaire réduit aurait besoin de peu de terres supplémentaires (figure 2) et aurait un approvisionnement en azote acceptable (figure 3) si l'on suppose que les impacts du CC sur les rendements sont moyens. Si l'on suppose que les écarts de rendement sont faibles et que les impacts du changement climatique sur les rendements sont plus faibles pour l'agriculture biologique que pour l'agriculture conventionnelle, la viabilité d'une part importante de l'agriculture biologique en termes d'utilisation des terres devient par conséquent plus viable, tandis qu'un approvisionnement adéquat en azote devient légèrement plus difficile, en raison d'une baisse relative de la disponibilité de l'azote provenant des résidus de culture et de la fixation de l'azote par rapport aux rendements (figures supplémentaires 1 à 4).

Implications diététiques des différents scénarios. Nous illustrons comment les différentes stratégies du système alimentaire abordées dans ce document peuvent influencer la consommation en analysant la consommation alimentaire dans les différents scénarios. Tous les scénarios discutés ici remplissent la condition de fournir la même quantité de calories que le scénario de référence (corrigée en conséquence lorsque le gaspillage alimentaire est réduit). Dans le modèle, la part des légumineuses est portée à 20 % des surfaces cultivées dans les systèmes de production biologique. Cela entraîne une légère modification de la composition du régime alimentaire (parts de l'apport en protéines ; figure 5 supplémentaire) et une augmentation du rapport protéines/calories (c'est-à-dire la part des calories fournies par les protéines) pour la production biologique intégrale de 12 %, contre 10,9 % dans le scénario de référence. Ce chiffre est supérieur au niveau minimum de 10 % recommandé par le Food and Nutrition Board de l'Académie nationale des sciences des États-Unis³¹. La part des produits animaux diminue de 38 % dans le scénario de référence à 36 % pour le 100 % biologique, car les légumineuses supplémentaires remplacent la viande. En général, les impacts plus ou moins importants du changement climatique sur les rendements, ou les écarts de rendement élevés ou faibles, n'affectent pas de manière substantielle les régimes alimentaires humains selon notre modèle (figures supplémentaires 6-8).

Avec une réduction des aliments concurrents, la composition du régime alimentaire change considérablement. La part des produits animaux dans l'approvisionnement total en protéines passe de 38 à 11 % avec une réduction de 100 % des aliments concurrents²⁶. Pour une réduction de 100 % des aliments en concurrence avec les aliments, en raison de la diminution du nombre d'animaux, le modèle augmente la part des légumineuses jusqu'à 20 % pour tous les systèmes de production afin de compenser la perte de protéines animales. Par conséquent, l'augmentation de la

part de la production biologique n'augmente pas davantage la part des légumineuses, qui représente déjà 20 % de la superficie totale des terres cultivées, mais entraîne une baisse des rendements. Cela explique la diminution de la part des légumineuses dans les régimes alimentaires lorsque la production biologique augmente, comme le montrent les figures supplémentaires 5 à 8. Le rôle des légumineuses montre également que les scénarios prévoyant une réduction des aliments concurrents et ceux prévoyant une augmentation de la part des produits biologiques se complètent idéalement. L'augmentation de la part des légumineuses est nécessaire pour compenser la diminution de l'offre de protéines animales (scénarios de réduction des aliments concurrents des aliments) et pour assurer l'approvisionnement en azote (scénarios biologiques). Les effets du changement climatique et des écarts de rendement sur les régimes alimentaires sont également beaucoup plus faibles que l'impact du niveau de réduction des aliments concurrents (figures supplémentaires 5-8). Cela est dû aux définitions des scénarios qui restent aussi proches que possible du scénario de référence, y compris les parts relatives des produits de base. Cela s'applique également aux parts de légumineuses pour lesquelles les effets du changement climatique et des écarts de rendement sont beaucoup plus faibles que l'impact du niveau de concurrence des aliments pour animaux.

Impacts environnementaux. Une conversion à 100 % à l'agriculture biologique entraînerait une réduction des impacts pour une série d'indicateurs environnementaux autres que ceux déjà examinés ci-dessus (figure 4). Une exception est le potentiel d'érosion des sols, qui augmente de 10 à 20 % par rapport au scénario de référence (c'est-à-dire une augmentation de 20 à 30 % par rapport à l'année de référence ; les fourchettes concernent les effets avec et sans CIC). Cela est dû à l'augmentation de la superficie des terres en production biologique et à l'hypothèse prudente de taux d'érosion du sol similaires en production biologique et conventionnelle. L'excédent de P reste pratiquement au même niveau que dans la situation de référence, en raison de l'hypothèse selon laquelle les systèmes biologiques fonctionnent avec des niveaux d'intrants de P non renouvelable similaires à ceux des systèmes conventionnels. Il s'agit d'une estimation prudente, car le P disponible dans le sol et le P provenant des intrants organiques sont souvent pris en compte par les producteurs biologiques lorsqu'ils décident des niveaux de fertilisation. En raison du manque de données, nous ne modélisons pas cet aspect. En ce qui concerne la demande d'énergie non renouvelable, une diminution de 19 à 27 % peut être obtenue (principalement en raison de la réduction des engrais synthétiques et des différences dans l'utilisation de l'énergie, comme indiqué dans la base de données Ecoinvent 2.0), par rapport à la situation de référence (c'est-à-dire une diminution de 4 à 14 % par rapport à l'année de référence). Même les émissions de gaz à effet de serre peuvent être quelque peu réduites avec cette stratégie, de 3 à 7 % par rapport au scénario de référence si les émissions liées à la déforestation et aux sols organiques sont incluses, mais elles représentent toujours une augmentation de 8 à 12 % par rapport à l'année de référence. Cette réduction nette dans le cadre d'une conversion à 100 % à l'agriculture biologique s'explique par le fait que les émissions liées aux sols fertilisés diminuent considérablement et que les émissions liées à la production d'engrais synthétiques, qui y contribuent également de manière significative, tombent à zéro, tandis que les émissions liées au bétail et au méthane provenant du riz n'augmentent que légèrement. En somme, ces effets compensent l'augmentation des émissions due à l'utilisation accrue des terres et à la déforestation. Comme cette réduction est donc principalement due à des niveaux de fertilisation azotée généralement plus faibles (pas d'engrais minéraux) et à des émissions plus faibles dues à l'application d'engrais dans la production biologique, il est important de souligner que toute augmentation de l'apport d'azote pour faire face à ces niveaux d'azote extrêmement faibles dans l'agriculture biologique augmenterait de manière correspondante les émissions de N₂O dues à l'application d'engrais.

Nous soulignons également que ces calculs d'émissions suivent les directives du GIEC et ne se réfèrent pas aux récentes méta-études sur les facteurs d'émission³². Skinner et al.³² ont trouvé des facteurs d'émission plutôt plus élevés pour la production biologique que pour la production conventionnelle. D'autre part, ils constatent que les apports totaux d'azote ne sont qu'un faible déterminant des émissions totales pour la production biologique, alors qu'ils sont un bon déterminant pour les systèmes conventionnels. Cependant, les preuves ne sont pas encore assez solides pour s'écarter de l'approche classique du GIEC dans un tel modèle de systèmes alimentaires mondiaux. Nous n'utilisons donc pas de facteurs d'émission adaptés aux différents systèmes de production et types d'engrais et ne remettons pas en question la proportionnalité aux intrants de la production biologique. Une partie relativement faible de la différence d'émissions de GES reflète à nouveau la différence d'utilisation de l'énergie. Sans les émissions dues à la déforestation et à la perte de sol organique, les émissions de GES sont réduites de 11 à 14 % (ce qui représente tout de même une augmentation de 12 à 14 % par rapport au niveau de référence). L'utilisation de l'eau est similaire à celle du scénario de référence, ce qui signifie une augmentation de 60 %, par rapport à l'année de

référence. Cela s'explique par le fait que, en l'absence de preuves du contraire, nous avons supposé une demande en eau similaire par tonne de production pour les systèmes biologiques et conventionnels. Contrairement aux superficies totales, les volumes de production totaux ne changent pas beaucoup, car, par hypothèse, tous les scénarios fournissent les mêmes niveaux de calories et de protéines. Les pesticides de synthèse n'étant pas utilisés dans l'agriculture biologique, leur impact est donc nul. Cependant, cela ne tient pas compte de l'augmentation des pesticides non synthétiques dans les systèmes organiques, comme le cuivre (la gestion organique permet l'utilisation de certains pesticides non synthétiques qui peuvent être potentiellement dangereux pour l'environnement).

Les impacts sur les indicateurs environnementaux de la conversion à l'agriculture biologique, complétée par une réduction de 100 % de la nourriture concurrente des aliments (FCF) et une réduction de 50 % du gaspillage alimentaire, sont présentés à la figure 5 (le panneau supérieur gauche utilise les mêmes données que la figure 4). La figure supplémentaire 10 présente en outre les résultats des scénarios intermédiaires avec une réduction de 50 % de la nourriture concurrente et de 25 % du gaspillage alimentaire. Les schémas restent similaires, mais le fait de compléter la conversion à l'agriculture biologique par ces stratégies supplémentaires permet d'obtenir des impacts plus faibles pour tous les indicateurs (du moins sans CPI). Des améliorations importantes sont notamment obtenues par la réduction du FCF. La figure 11 annexe présente les résultats des impacts environnementaux en supposant des écarts de rendement faibles plutôt que élevés. Les principales différences sont la réduction de la demande de terres avec des écarts de rendement plus faibles et la situation un peu plus difficile concernant l'approvisionnement en azote.

Les figures supplémentaires 12 à 15 présentent ces résultats dans un autre modèle permettant d'évaluer plus facilement la part de la production biologique qui peut être réalisable en fonction des différents impacts environnementaux pour des scénarios prévoyant une réduction de 50 % des aliments concurrents, une réduction de 25 % ou 50 % du gaspillage alimentaire, des impacts intermédiaires des CC sur les rendements et des écarts de rendement élevés et faibles. Les facteurs les plus déterminants pour la faisabilité sont l'utilisation des terres et l'excédent d'azote.

Nous avons modélisé une série d'indicateurs environnementaux clés, mais nous n'avons pas modélisé les impacts sur la biodiversité, étant donné la complexité et, pour de nombreux indicateurs, l'inadéquation de leur capture dans un modèle global. Cependant, en établissant un lien avec les impacts qui sont en corrélation avec la biodiversité, il est possible de donner quelques indications sur les impacts sur la biodiversité : L'augmentation de l'utilisation de la surface et de la déforestation dans le cadre de l'agriculture biologique augmente plutôt la pression sur la biodiversité, tandis que la réduction de l'utilisation de pesticides et de l'excédent d'azote réduit cette pression. On retrouve moins d'ambiguïté lorsqu'on combine la conversion à l'agriculture biologique avec les deux autres stratégies de systèmes alimentaires, ce qui entraîne une réduction globale de tous les impacts environnementaux, y compris l'utilisation de la surface, et suggère donc une réduction générale de la pression sur la biodiversité dans le cadre de ces scénarios combinés.

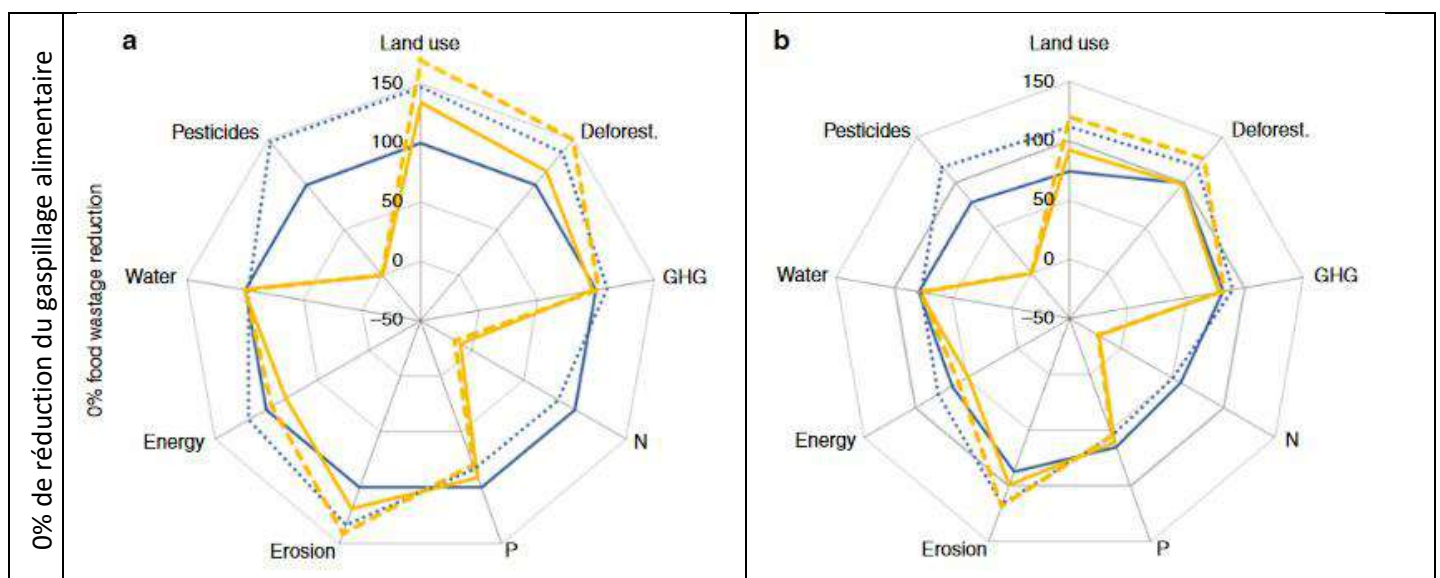
Discussion

L'agriculture biologique ne peut contribuer à fournir une alimentation suffisante à la population de 2050 et à réduire simultanément les incidences de l'agriculture sur l'environnement que si elle est mise en œuvre dans un système alimentaire bien conçu dans lequel les rations alimentaires des animaux, et par conséquent la réduction du nombre d'animaux et de la consommation de produits animaux, ainsi que le gaspillage alimentaire sont pris en compte. La seule conversion à une production 100 % biologique dans un système de production agricole qui devrait fournir les mêmes quantités et la même composition de produits que dans le scénario de référence n'est pas viable et entraînerait une augmentation de l'utilisation des terres agricoles. Pour être en mesure d'évaluer de manière exhaustive le potentiel et les défis d'une conversion mondiale à l'agriculture biologique, la modélisation des conséquences d'une telle conversion doit être basée sur une perspective globale des systèmes alimentaires, comme cela a été adopté ici, plutôt que de simplement aborder les écarts de rendement de la production biologique. Les principaux défis liés à la demande de terres et, dans une moindre mesure, à l'approvisionnement en azote, dans le cadre d'une conversion à grande échelle à la production biologique, reflètent également la perspective multifactorielle du maintien de la fertilité des sols, du recyclage des éléments nutritifs et des services écosystémiques, plutôt que l'adoption d'un objectif de rendement maximal pour une seule culture comme critère de performance autonome.

La réduction de la demande moyenne mondiale de produits animaux et de leur part dans l'alimentation humaine est une stratégie pour des systèmes alimentaires plus durables sur la base d'arguments liés à l'utilisation des ressources naturelles, à l'impact environnemental et à la santé humaine^{9,33-35}. Nous avons montré que les performances environnementales favorables de la réduction du nombre d'animaux dans une production animale sans aliments concurrents et de l'agriculture biologique peuvent être combinées pour fournir un modèle prometteur pour une production agricole, un approvisionnement alimentaire et une consommation plus durables. Dans nos scénarios, le rôle de l'élevage est à nouveau axé sur l'utilisation de ressources qui, autrement, ne seraient pas disponibles pour la consommation alimentaire humaine, à savoir les prairies et autres pâturages, et les sous-produits de la production alimentaire²⁶. Il est intéressant de noter que dans un tel système, la nécessité de réduire la production de produits animaux découle de caractéristiques agronomiques et physiques/techniques, notamment en limitant l'approvisionnement en aliments pour animaux à l'énergie et aux protéines provenant de ressources qui ne peuvent pas être utilisées directement pour la production alimentaire, comme les prairies et une série de sous-produits de transformation. Elle n'est pas motivée par des changements de régime alimentaire imposés de l'extérieur au niveau du consommateur, bien que ces changements soient une conséquence évidente des changements de production.

Les modes de consommation alimentaire jouent également un rôle clé pour l'agriculture durable en ce qui concerne un deuxième aspect abordé dans ce modèle, à savoir le gaspillage alimentaire. Dans les scénarios de conversion à l'agriculture biologique et de réduction des aliments concurrents, l'agriculture était tenue de fournir la même quantité de calories et de protéines que dans le scénario de référence⁷, fixant cette demande comme référence à respecter. Cependant, cette demande moyenne mondiale de 3028 kcal/cap/jour, telle que modélisée par la FAO, inclut le gaspillage alimentaire, qui s'élève à 30-40% au niveau mondial, selon les estimations les plus récentes de 2011³⁶. La réduction du gaspillage alimentaire offre donc une approche complémentaire pour réduire l'utilisation des ressources et l'impact environnemental de l'agriculture.

En résumé, notre étude montre que l'agriculture biologique peut contribuer à fournir une alimentation suffisante et à améliorer les impacts environnementaux, uniquement si des proportions suffisamment élevées de légumineuses sont produites et si l'on réduit de manière significative l'utilisation d'aliments concurrents, les quantités de produits animaux et le gaspillage alimentaire. Le développement de l'agriculture biologique à l'avenir devrait relever ces défis du côté de la consommation, et ne pas se concentrer uniquement sur la production durable. Cela réduirait notamment la nécessité d'augmenter les rendements, et une combinaison judicieuse de mesures de production et de consommation permettrait d'obtenir un système alimentaire optimal. Toutes les tâches difficiles : "augmenter les rendements (biologiques)", "augmenter la production biologique", "réduire le gaspillage alimentaire" et "réduire le nombre d'animaux et la consommation de produits animaux" seraient mises en œuvre ensemble. Ainsi, aucune d'entre elles ne ferait l'objet d'une mesure unique à couverture maximale. Toutes pourraient être mises en œuvre à une couverture partielle seulement et en combinaison, conduisant aux améliorations nécessaires pour accroître la durabilité du système alimentaire mondial.



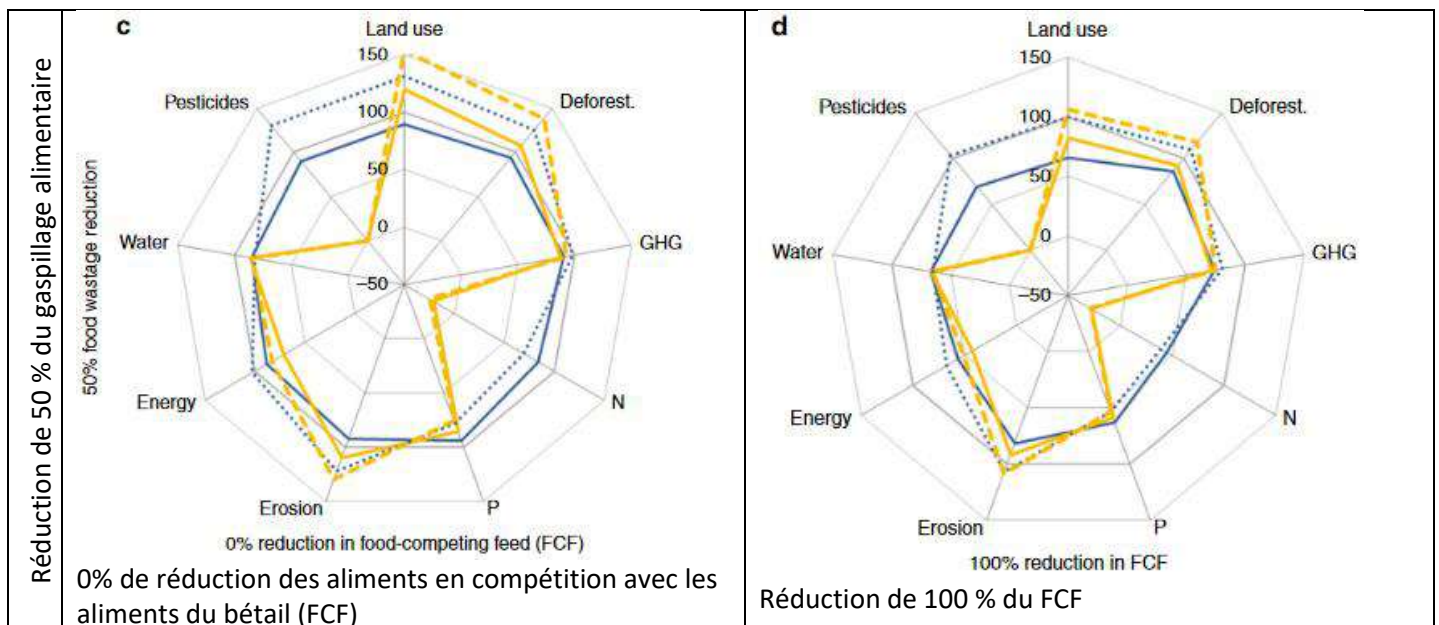


Fig. 5 Impacts environnementaux relatifs en 2050 d'une conversion totale à l'agriculture biologique en combinaison avec des stratégies complémentaires de systèmes alimentaires. Impacts environnementaux des scénarios biologiques (100 % d'agriculture biologique, lignes jaunes) et conventionnels (0 % d'agriculture biologique, lignes bleues) avec des changements concomitants dans les stratégies d'alimentation du bétail et de gestion des déchets alimentaires. Tous les scénarios sont présentés par rapport au scénario de référence (c'est-à-dire 0 % d'agriculture biologique, aucun changement dans les stratégies d'alimentation du bétail et de gaspillage alimentaire ; ligne gris foncée), avec (lignes pointillées) et sans (lignes pleines) impact du changement climatique sur les rendements ; les calories sont maintenues constantes pour tous les scénarios. Les chiffres sur l'axe indiquent le pourcentage d'impact, par rapport au scénario de référence ; les calories sont maintenues constantes pour tous les scénarios sans réduction du gaspillage alimentaire. L'utilisation d'aliments en concurrence avec les aliments (FCF) se situe aux niveaux du scénario de référence à gauche, aetc, et évolue vers une utilisation FCF nulle à droite, banded ; la réduction du gaspillage passe de 0 %, en haut aetb, à 50 %, en bascandd. Indicateurs affichés : utilisation des terres cultivées, déforestation, émissions de GES (y compris déforestation, sols organiques), surplus de N et surplus de P, utilisation de l'eau, utilisation d'énergie non renouvelable, érosion des sols, utilisation de pesticides. Les résultats des scénarios intermédiaires (réduction de 50 % du FCF et de 25 % du gaspillage alimentaire) sont présentés dans la figure supplémentaire 10.

Méthodes

Description générale du modèle SOL. Le modèle SOL 26 est un modèle ascendant, à flux de masse, de la production agricole et du secteur alimentaire. Il est calibré avec les données de FAOSTAT37, en particulier les bilans alimentaires 38, et couvre tous les pays et territoires géographiques ainsi que les produits de base couverts par FAOSTAT. Compte tenu du manque de données pour un certain nombre d'entre eux, cela équivaut à une couverture détaillée de 180 cultures primaires et 22 activités primaires d'élevage dans 192 pays. Derrière cela, des données sur les arbres de com-modité de FAOSTAT sont utilisées, couvrant environ 700 produits intermédiaires. Dans ce qui suit, seuls les principaux aspects et les caractéristiques générales du modèle SOL sont présentés, car une description détaillée est déjà disponible ailleurs 26.

Chaque activité de culture et d'élevage dans le modèle SOL est caractérisée par un ensemble d'entrées et de sorties, c'est-à-dire tous les flux physiques de quantités et de nutriments liés aux activités individuelles. Les intrants des activités d'élevage sont les aliments pour animaux, l'énergie nécessaire à la construction des bâtiments, les processus réalisés dans les étables (nettoyage, alimentation) et les clôtures. Les extrants comprennent les produits comestibles (viande, lait, œufs) et non comestibles (peaux, cuirs, os, etc.), l'excrétion de fumier, les pertes de nutriments et les émissions de gaz à effet de serre (fermentation entérique, gestion du fumier ; CH₄, N₂O, NO₃ et NH₃). Les aliments pour animaux sont subdivisés en quatre catégories : a) les cultures fourragères cultivées sur des terres arables, b) les aliments concentrés dérivés de denrées alimentaires comestibles pour l'homme (par exemple, céréales, légumineuses) cultivées sur des terres arables, c) les aliments pour animaux issus de prairies et d) les aliments pour animaux issus de sous-produits agricoles/agri-industriels. Les aliments pour animaux cultivés sur les terres arables (a et b) sont en concurrence avec la production de denrées alimentaires (appelés "aliments en concurrence avec les denrées alimentaires"), tandis que les aliments pour animaux et les sous-produits issus des prairies ne le sont pas (c et d).

Pour les bovins, les porcs et les poulets, les structures de troupeaux spécifiques à chaque pays ont été calculées à l'aide d'un modèle d'entropie maximale³⁹. Cette méthode permet d'obtenir la distribution la plus probable des classes d'âge dans le nombre déclaré d'animaux vivants et d'animaux producteurs, ainsi que le nombre déclaré d'animaux vivants importés et exportés, et permet une évaluation plus détaillée de la demande en aliments pour animaux et autres intrants, ainsi que des incidences sur l'environnement.

Le poisson et les fruits de mer ne sont pas au cœur du modèle SOL et sont traités de manière plus détaillée dans la section "Approvisionnement en poissons, fruits de mer et aquaculture" du matériel complémentaire d'un document antérieur sur le modèle²⁶. Les principales hypothèses sont les suivantes : en 2050, on suppose que 60 % de l'approvisionnement total en poissons et fruits de mer proviennent de l'aquaculture et que 75 % de l'aquaculture est nourrie, ce qui donne un approvisionnement de 45 % de l'approvisionnement total en poissons et fruits de mer en 2050 provenant de l'aquaculture nourrie. Cette part est réduite de manière correspondante par la réduction des composants alimentaires concurrents, ce qui entraîne une baisse de l'approvisionnement en poissons et fruits de mer de près de 50 % pour le scénario prévoyant une réduction de 100 % des aliments concurrents. Ces chiffres sont basés sur une série de références de la FAO et de l'OCDE⁴⁰⁻⁴³. De plus amples détails, références et arguments en faveur de ces choix sont donnés dans la référence sus mentionnée ²⁶.

Les intrants des activités de culture comprennent : les surfaces, les engrais minéraux et organiques (fumier, résidus de culture), la fixation de l'azote, les pesticides et les pratiques de gestion. Les extrants comprennent les rendements des cultures, les résidus, les pertes d'azote et de phosphore. Chaque animal et chaque culture s'accompagnent d'une série d'impacts environnementaux (occupation des sols, surplus de N et de P, utilisation d'énergie non renouvelable, émissions de gaz à effet de serre, utilisation d'eau, utilisation de pesticides, déforestation, érosion des sols).

Le modèle SOL est un modèle de bilan massique physique qui saisit les flux de biomasse et de nutriments pour évaluer la faisabilité physique de différents scénarios. Il ne tient pas compte des restrictions économiques et des effets du marché qui relient les changements de quantités aux changements de prix. Les aspects économiques sont essentiels pour la viabilité sociale de ces scénarios, mais leur inclusion se ferait au détriment de la différenciation détaillée des produits et des pays, et nécessiterait de nombreuses hypothèses supplémentaires sur les élasticités des prix et des prix croisés. Cela augmenterait considérablement la complexité du modèle et empêcherait une interprétation simple de la viabilité physique des scénarios, ce qui est notre objectif ici.

Les sous-sections suivantes décrivent les parties supplémentaires du modèle, les données et les hypothèses utilisées dans ce document qui ne sont pas encore décrites dans la section précédente et dans un document antérieur et son matériel en ligne ²⁶.

Différenciation entre l'agriculture biologique et l'agriculture conventionnelle. Pour le secteur de l'élevage, nous ne supposons aucune différence entre la production biologique et la production conventionnelle, à part un écart de rendement de 10 %. Pour le lait et les œufs, l'écart de rendement se réfère à la production par animal et par an ; pour la viande, l'écart de rendement se réfère au poids à l'abattage. Dans les systèmes inorganiques, on atteint souvent le même poids d'abattage que dans les systèmes conventionnels, mais après un temps plus long que dans les systèmes conventionnels. Dans notre modèle, cela est traité de manière équivalente (nombre plus faible d'animaux de boucherie avec le même rendement et nombre plus élevé d'animaux avec des rendements plus faibles). En particulier, nous ne supposons pas de rations alimentaires systématiquement différentes entre ces deux systèmes de production. L'écart de rendement de 10% est un peu plus conservateur que les valeurs rapportées dans la littérature, qui correspondent à un écart de rendement de 3,2%²¹. Nous avons choisi cette valeur plus conservatrice parce que la référence utilisée²¹ fait état d'écarts de rendement plutôt faibles en général et parce que les autres méta-études, plus conservatrices, sur les écarts de rendement des produits biologiques ^{17,44,45} ne font pas état de valeurs pour les animaux.

Gestion des cultures : L'agriculture biologique se caractérise par l'interdiction d'utiliser des engrais et des pesticides de synthèse, et par un intérêt particulier pour la fertilité des sols et la rotation des cultures, le cycle des nutriments et la dynamique des écosystèmes⁴⁶. Dans le modèle SOL, ces éléments sont pris en compte en fixant à zéro les engrais azotés et les pesticides de synthèse pour les productions biologiques, ainsi qu'en supposant 20 % de cultures de légumineuses dans les rotations de cultures, c'est-à-dire une culture de légumineuses tous les 5 ans, et par des hypothèses sur les rendements. Des taux de fixation de N spécifiques aux cultures de légumineuses ont été

utilisés⁴⁷. La composition des légumineuses cultivées dans les systèmes biologiques a été choisie de manière à refléter la répartition entre les différentes cultures de légumineuses telle que rapportée dans le scénario de référence. Pour le système biologique, cela surestime plutôt la part relative des légumineuses alimentaires par rapport à l'engrais vert. De manière prudente, on suppose que le phosphate naturel est utilisé comme source de P dans l'agriculture biologique dans des rapports similaires à la demande de P, comme les engrais minéraux P sont utilisés dans l'agriculture conventionnelle.

Rendement des cultures : Les rendements de l'agriculture biologique sont généralement inférieurs à ceux de l'agriculture conventionnelle. Pour les principaux résultats présentés dans le document, nous nous basons sur les estimations les plus prudentes des rendements biologiques, qui montrent un écart de rendement de 25 % en moyenne¹⁷. Nous effectuons une analyse de sensibilité concernant ces écarts de rendement et calculons également les rendements biologiques pour la partie inférieure des estimations d'écart de rendement, c'est-à-dire pour les estimations de rendement biologique les plus élevées (un écart de rendement moyen de 8 %) ²¹. La méta-analyse la plus récente⁴⁴ montre un écart de rendement moyen de 20 % et se situe donc entre ces deux valeurs. En particulier, l'analyse faisant état de faibles écarts de rendement, c'est-à-dire de rendements biologiques élevés²¹, a été très contestée^{19,20} et nous insistons sur le fait que nous utilisons la fourchette couverte par les rendements biologiques faibles¹⁷ et élevés²¹ pour l'analyse de sensibilité des écarts de rendement potentiels, des estimations les plus prudentes aux plus optimistes disponibles dans la littérature, sans évaluer davantage la position de l'extrémité la plus optimiste de cette fourchette. Par souci de prudence, nous n'avons rapporté que les résultats concernant les écarts de rendement élevés dans le document, et rapportons ceux concernant les écarts de rendement faibles dans les figures supplémentaires.

Pour les scénarios, nous supposons que les écarts de rendement sont les mêmes pour les pays en développement et les pays développés, bien que les données relatives à l'écart de rendement le plus élevé ne concernent que les pays développés¹⁷. Cette hypothèse repose sur le fait que les progrès technologiques conduisent probablement à une convergence de la productivité agricole dans les pays développés et en développement, tant pour les systèmes conventionnels que biologiques. Des rendements plus élevés pour la production biologique dans les pays en développement sont signalés dans l'étude avec de faibles écarts de rendement²¹, mais les données des pays en développement comparent souvent des systèmes biologiques gérés de manière optimale avec des systèmes conventionnels plutôt inefficaces, ou sont basées sur des comparaisons de systèmes non conventionnels qui ne sont toutefois pas qualifiés de biologiques (par exemple le système d'intensification du riz SRI) avec des systèmes conventionnels. On peut supposer que des systèmes conventionnels gérés de manière optimale seraient également beaucoup plus performants, ce qui conduirait à des écarts de rendement similaires à ceux observés dans les pays développés.

Facteurs d'émission : Les facteurs d'émission, tels que ceux liés à l'application d'engrais ou à la gestion du fumier, ainsi que l'érosion des sols, la pression de la déforestation et l'utilisation de l'eau sont supposés être identiques entre la production biologique et la production conventionnelle. Cette hypothèse est motivée par l'objectif de fournir une estimation prudente de la performance de l'agriculture biologique et par le manque de données solides pour justifier l'utilisation de paramètres différents entre les deux systèmes. Lorsque les données permettaient une différenciation, nous l'avons supposée, par exemple pour la consommation d'énergie (CED) sur la base des données d'Ecoinvent 2.0.

Gaspillage alimentaire. FAOSTAT ne rapporte que des chiffres incomplets sur le gaspillage alimentaire, et nous avons donc utilisé les données plus détaillées de l'empreinte du gaspillage alimentaire^{10,48}. Ces données fournissent des parts de gaspillage alimentaire pour les groupes de produits et les régions du monde, qui sont ensuite appliquées à tous les pays et produits au sein des régions et groupes de produits respectifs⁴⁸. Les données sur le gaspillage sont fournies tout au long de la chaîne de valeur, de la production à la consommation et à la mise en décharge (en distinguant cinq étapes de la chaîne de valeur : la production agricole, la manutention et le stockage après récolte, la transformation, la distribution et la consommation ; la mise en décharge inclut les émissions de GES dues à la décomposition anaérobie de la biomasse gaspillée), et les parts correspondantes sont additionnées pour obtenir les parts de gaspillage au niveau des produits primaires. Les scénarios de réduction du gaspillage supposent une diminution de 25 et 50 % du gaspillage, c'est-à-dire que la part de gaspillage de chaque produit est réduite de 25 et 50 % respectivement. Les scénarios retracent donc les effets des réductions de gaspillage de 0 % à 50 %. Dans le

modèle, cela se traduit par la non-production d'une quantité correspondante de chaque produit, ce qui entraîne une réduction de la demande d'intrants et des impacts.

Impact du changement climatique sur les rendements des cultures. Quelques publications récentes évaluent l'impact du changement climatique sur les rendements⁴⁹⁻⁵³. Elles se concentrent principalement sur les cultures les plus importantes (blé, maïs, riz, soja), et pour la plupart des produits, aucune évaluation n'est disponible. En outre, plusieurs aspects spécifiques tels que l'inclusion potentielle de la fertilisation au CO₂ compliquent encore les résultats. Nous avons donc décidé d'entreprendre une analyse de sensibilité sur les impacts du changement climatique sur les rendements des cultures et de supposer une large gamme allant d'un extrême optimiste d'aucun impact du changement climatique sur les rendements (comme supposé dans le scénario de référence⁷) à une estimation pessimiste d'aucune augmentation supplémentaire des rendements par rapport à la ligne de base. Certaines publications font état de baisses de rendement potentielles par rapport aux niveaux actuels, mais nous avons décidé de ne pas inclure cette possibilité dans les scénarios. Nous avons donc modélisé des scénarios sans impact sur le changement climatique et avec un impact total sur le changement climatique reflétant une augmentation de rendement nulle comme extrêmes, et un scénario intermédiaire à titre d'illustration, qui suppose que les augmentations de rendement ne représentent que 50 % du scénario de référence. En raison du manque de données, nous avons supposé que les rendements des animaux ne seraient pas affectés par les effets du changement climatique.

En outre, nous avons modélisé des scénarios où l'agriculture biologique est moins touchée par le changement climatique que l'agriculture conventionnelle. Cette hypothèse reflète l'argument selon lequel l'agriculture biologique est mieux adaptée au changement climatique que l'agriculture conventionnelle ; toutefois, les preuves à cet égard sont rares et aucune déclaration concluante ne peut être faite^{54,55}. À titre d'illustration, nous avons modélisé cette situation en supposant que le changement climatique n'a qu'un impact de 60 % sur les rendements de l'agriculture biologique par rapport aux rendements de l'agriculture conventionnelle, mais nous présentons les résultats correspondants dans les figures supplémentaires uniquement et non dans le corps de l'article.

Indicateurs environnementaux. Cette section décrit brièvement les indicateurs environnementaux utilisés dans le modèle SOL. Pour plus de détails, nous nous référons à la littérature²⁶.

Occupation des terres : L'occupation des sols mesure les surfaces cultivées et les prairies utilisées pour la production agricole. Pour les terres cultivées, l'occupation des sols combine la superficie récoltée et l'intensité des cultures. Cette dernière indique combien de fois un hectare est récolté en moyenne. Les intensités de culture sont généralement inférieures à un (en raison des surfaces en jachère) et, par conséquent, l'occupation des sols indique des valeurs plus élevées que les surfaces récoltées⁷.

Dans tous les scénarios, on suppose que les superficies des prairies restent constantes²⁶. Il convient de mentionner que de nombreuses prairies et pâturages sont actuellement soumis à de fortes pressions environnementales et sociétales. Concentrer la production mondiale de ruminants sur ces zones nécessiterait donc de relever ces défis de manière adéquate⁵⁶.

Les changements dans l'utilisation des terres se font donc uniquement entre les terres arables et les terres non agricoles (par exemple, les forêts). L'indicateur d'occupation des terres cultivées rend compte de la demande totale de terres dans les scénarios, quelle qu'en soit la provenance, tandis que l'indicateur de déforestation rend compte de la pression exercée par cette demande de terres sur les forêts dans les pays où la déforestation est un problème, en supposant des schémas d'approvisionnement en terres similaires à ceux du scénario de référence (voir plus bas).

Excédent N : L'excédent N décrit la différence entre les entrées et les sorties d'azote. Les entrées d'azote pour les cultures sont les engrais minéraux, la fixation de l'azote, les engrais organiques, les résidus de culture et les semences. Les apports d'azote sont calculés à partir de l'azote disponible (engrais minéraux, fixation de l'azote, résidus de culture et fumier), attribué aux différentes cultures en fonction de leur demande relative d'azote par rapport à la demande totale d'azote de toutes les cultures. L'azote provenant des dépôts atmosphériques n'est pas inclus dans l'excédent d'azote. La production totale d'azote d'une culture correspond à la quantité d'azote absorbée par la culture pendant la période de croissance, c'est-à-dire la quantité d'azote dans les rendements et les résidus de culture, ainsi que les émissions (NO₃, NH₃ et N₂O). Pour les activités de culture biologique, seuls les apports organiques d'azote sont possibles (fumier, fixation de l'azote, résidus de culture), car les engrais minéraux d'azote ne

sont pas autorisés. Pour les animaux, les entrées d'azote sont les aliments pour animaux et les sorties d'azote sont les rendements, le fumier et les émissions provenant du fumier (NO₃, NH₃ et N₂O). Les sources d'entrée et de sortie de l'azote couvrent donc tous les flux et composés pertinents, en particulier les émissions directes, la volatilisation et la lixiviation de N₂O, NH₃ et NO₃ provenant de la gestion du fumier et de l'application d'engrais de toute sorte. Les résultats du modèle SOL pour l'excédent global de N et pour les agrégats de sous-catégories, comme la fixation de N, etc. dans l'année de base sont conformes à la littérature (tableau supplémentaire 1)^{47,57,58}.

En plus de l'écart de rendement, nous n'avons pas supposé de différences systématiques entre les activités d'élevage biologique et conventionnel qui pourraient affecter l'excédent d'azote.

L'excédent d'azote est affiché comme une moyenne globale par hectare. Il s'agit donc de tous les apports et rejets d'azote des terres cultivées et des prairies et d'une moyenne sur toutes ces surfaces. Il ne peut donc pas être comparé directement aux valeurs relatives aux terres cultivées mentionnées dans la littérature. L'utilisation de chiffres par hectare illustre notre volonté d'évaluer la viabilité de la production biologique d'un point de vue agronomique, car l'approvisionnement en azote est souvent considéré comme un défi pour la production biologique¹⁹⁻²¹. Le choix d'un excédent compris entre 10 kg/ha et 5 kg/ha comme optimal est motivé par la littérature qui rapporte que l'excédent d'azote pourrait être réduit de 50 à 70 % pour diverses céréales sans affecter les rendements, et par les chiffres sur la réduction potentielle de l'apport d'azote et la part de l'excédent d'azote par rapport aux intrants, qui indiquent des taux de réduction encore plus élevés^{59,60} ; la fourchette optimale choisie dans le modèle signifie une réduction de 60-80% par rapport au scénario de référence et nous avons donc choisi cette fourchette un peu plus élevée de réduction de 60-80% de l'excédent d'azote comme un niveau optimal illustratif à prendre en compte dans l'évaluation de la viabilité des changements de l'excédent d'azote dans les scénarios d'un point de vue agronomique.

La situation potentiellement difficile de l'approvisionnement en azote en agriculture biologique a également été abordée dans la littérature²¹. Ils suggèrent que ce défi pourrait être relevé si les intensités de culture devaient augmenter et si les jachères et les cultures intercalaires devaient être systématiquement utilisées pour la production de légumineuses. Nous n'avons pas incorporé cet aspect dans le modèle car il nécessiterait une série d'hypothèses incertaines supplémentaires, notamment sur la disponibilité de l'eau, l'adéquation globale des zones pour la culture de légumineuses hors saison et les rendements. L'évaluation correspondante²¹ est très contestée, car elle suppose que les légumineuses sont placées entre les cultures principales sur toutes les zones, ce qui donne 1360 millions d'hectares supplémentaires de légumineuses, et suppose un taux de fixation de l'azote très élevé d'environ 100 kgN/ha. A ce sujet, nous renvoyons également à l'évaluation critique de cette analyse^{19,20}.

P-surplus : Comme pour N, le surplus de P est défini comme la différence entre les entrées et les sorties de P. Les flux de P sont exprimés en P₂O₅. Les entrées et les sorties sont les engrais minéraux de P, le P₂O₅ dans les aliments pour animaux, le fumier, les résidus de culture et les rendements. Lors de l'évaluation de l'excédent de P, il faut tenir compte du fait que de grandes quantités de P sont fixées dans les sols et que l'excédent exprime donc davantage un "potentiel de perte", qui peut être réalisé, par exemple par l'érosion, que les pertes réelles pour l'environnement. Les résultats du modèle SOL pour le bilan P total de l'année de base sont cohérents avec les valeurs de la littérature⁵⁸.

Utilisation d'énergie non renouvelable : La méthode d'évaluation de l'impact du cycle de vie "demande énergétique cumulative" (DEC)⁶¹ est utilisée pour calculer l'utilisation d'énergie non renouvelable. Les composantes d'énergie renouvelable ne sont pas prises en compte. La part de l'énergie non renouvelable pour les carburants et l'électricité a été supposée rester constante dans tous les scénarios et on a supposé des progrès techniques en matière d'efficacité énergétique.

Les données d'inventaire pour chaque activité, y compris la différenciation entre l'utilisation de l'énergie dans les activités conventionnelles et biologiques, ont été tirées de bases de données ACV, à savoir la base de donnéesecoinvent 2.0 et d'autres sources⁶²⁻⁶⁴. L'utilisation d'énergie est liée aux activités agricoles et comprend l'utilisation d'énergie pour les semences, la protection des cultures, la fertilisation, la mécanisation, la fertilisation organique, les clôtures, les étables et les dépôts de fourrage grossier. Les données relatives à la production animale proviennent de la base de données ecoinvent 2.0 et d'autres sources^{64,65}. La consommation d'énergie pour la production d'engrais est modélisée spécifiquement pour les quantités d'engrais utilisées pour chaque culture dans

chaque pays. Les intrants des vecteurs énergétiques ont été modélisés selon les inventaires ecoinvent 2.0 et SALCA66. En raison du manque de données sur le commerce, l'utilisation de l'énergie pour le transport n'a pas été prise en compte. Nous soulignons que les chiffres absolus sur l'utilisation de l'énergie peuvent être biaisés en raison de la qualité des données de l'ecoinvent 2.0, qui est en partie assez ancien, mais les différences relatives entre les scénarios sont beaucoup moins sensibles à ces problèmes de données.

Émissions de gaz à effet de serre : Les émissions de GES sont basées sur les approches de niveau 1 et 2 des lignes directrices du GIEC de 2006. Les émissions liées aux intrants et aux infrastructures agricoles proviennent de la base de données ecoinvent 2.0 et d'études ACV62-64. Les émissions liées à la déforestation et aux sols organiques gérés par l'agriculture proviennent de FAOSTAT (2). Nous n'avons pas différencié les facteurs d'émission entre les systèmes de production biologiques et conventionnels et nous avons supposé que les systèmes de production biologiques et conventionnels avaient la même alimentation et les mêmes parts dans les différents systèmes de gestion du fumier.

Pour les GES, les potentiels de réchauffement planétaire (PRP) de la méthodologie 100aTier 1 du GIEC 2006 ont été utilisés, c'est-à-dire 25 t CO₂e/t pour le CH₄ et 297 t CO₂e/t pour le N₂O. Les méthodes Tier 1 du GIEC ont été utilisées pour calculer les émissions provenant de la gestion du fumier et de l'application d'engrais. Les méthodes de niveau 1 du GIEC ont été utilisées pour calculer les émissions provenant de la gestion du fumier et de l'application d'engrais. La méthodologie de niveau 2 a été utilisée pour la fermentation continentale, afin de saisir les impacts des différents régimes d'alimentation. ecoinvent 2.0 et d'autres données⁶⁷ ont été utilisés pour calculer les émissions de GES provenant de la production d'engrais minéraux et de pesticides. Les émissions de GES provenant des processus et des bâtiments ont été calculées à partir des valeurs respectives du CED et de l'application de facteurs de conversion spécifiques aux processus dérivés d'ecoinvent 2.0. En agrégeant uniquement les catégories d'émissions communes, les résultats du modèle SOL pour les émissions totales de GES au cours de l'année de référence sont similaires aux valeurs rapportées dans la littérature (tableau supplémentaire 2)^{68,69}. Ces deux références bibliographiques diffèrent considérablement en ce qui concerne les valeurs des émissions provenant de la fermentation entérique ; les résultats du modèle SOL sont plus similaires aux valeurs basées sur les données d'émissions de FAOSTAT⁶⁸.

Utilisation de l'eau : L'utilisation de l'eau a été calculée à partir des données AQUASTAT⁷ sur la consommation d'eau d'irrigation par tonne de production irriguée et des données sur les superficies irriguées pour diverses cultures et catégories de cultures. Nous avons supposé que les valeurs d'irrigation par tonne de production irriguée étaient similaires pour la production biologique et conventionnelle. Les différences entre les systèmes sont alors dues à des rendements différents et à des parts de surface différentes pour les différentes cultures avec des valeurs d'irrigation spécifiques aux cultures différentes, telles que rapportées dans AQUASTAT.

Utilisation de pesticides : Il n'existe pas d'ensemble de données cohérent sur l'utilisation des pesticides couvrant différents pays, et nous avons donc développé un modèle d'évaluation d'impact pour évaluer l'utilisation des pesticides incorporant trois facteurs : l'intensité de l'utilisation des pesticides par culture et système d'exploitation agricole (PUI_{j,k}), la législation sur les pesticides dans un pays (PL_i), et l'accès aux pesticides par les agriculteurs dans un pays (API) (Tableau supplémentaire³).

Ce modèle a été décrit dans les informations supplémentaires de Schaderet al. (2015)²⁶ et nous citons cette description dans ce qui suit, car nous avons utilisé le même modèle dans ce travail.

Chaque facteur a été évalué sur une échelle de 0 à 3 par des experts internes et externes à la FAO (Jan Breithaupt, FAO, impliquant des experts des bureaux régionaux de la FAO ; Frank Hayer, Office fédéral suisse de l'environnement ; Bernhard Speiser, Institut de recherche de l'agriculture biologique, FiBL) ayant une expérience dans différents pays et avec différentes méthodes de calcul des impacts des pesticides (analyse du cycle de vie, évaluation des risques). Par exemple, si aucun pesticide nocif n'est utilisé dans une culture, si la législation d'un pays interdit complètement les pesticides nocifs ou si les exploitations n'ont pas du tout accès aux pesticides, le facteur d'impact pour une combinaison culture-pays sera de 0.

A titre d'exemple, le facteur d'impact de l'utilisation des pesticides (IFI_{j,k}) pour la production de café au Ghana était de 6 comme : Les valeurs de PL et AP sont indiquées dans le tableau supplémentaire 4 ci-dessous, les valeurs de PUI sont indiquées dans le tableau supplémentaire 5. Pour calculer le FI d'utilisation de pesticides spécifique à la culture et au pays, les trois facteurs ont été multipliés ensemble (Eqn1).

$$IF_{i,j,k} = PUI_{j,k} \times PL_i \times AP_i \forall i, j, k.$$

Ainsi, pour chaque culture dans chaque pays, une valeur comprise entre 0 et 9 a été attribuée par hectare, servant d'indicateur de l'utilisation globale de pesticides par culture et par pays (et par hectare). Les valeurs globales par pays ont été calculées en multipliant cet indicateur d'utilisation de pesticides par les surfaces cultivées respectives et en faisant la somme de toutes les cultures. L'intensité de l'utilisation des pesticides dans les activités biologiques a été évaluée à zéro pour l'ensemble des activités et des pays. Cette évaluation néglige certains aspects de la protection des plantes en agriculture biologique, comme l'utilisation du cuivre.

Déforestation : Les valeurs de déforestation de FAOSTAT pour la période de base 2005-2009 sont fixées par rapport à l'évolution des surfaces agricoles sur cette période dans chaque pays. Ce rapport est ensuite utilisé pour dériver les valeurs de déforestation à partir des changements de surface dans les scénarios. Ainsi, nous avons attribué 80 % de la déforestation à l'agriculture⁷⁰. L'hypothèse selon laquelle la pression de la déforestation par pays en 2050 sera la même que dans le scénario de base est très forte, mais en raison du manque de meilleures données au niveau mondial, nous avons décidé d'utiliser ces taux pour une première évaluation de la pression de la déforestation.

Dans certains cas, aucune donnée sur l'évolution de la surface agricole n'a été disponible pour 2005-2009. Ensuite, le rapport entre les zones de déforestation (multipliées par 0,8) et la surface totale des terres agricoles a été construit pour l'année de base. Ce rapport est ensuite multiplié par les surfaces agricoles totales dans les scénarios pour obtenir des valeurs de déforestation. Dans ces cas, nous avons donc utilisé la superficie agricole totale (au lieu de la variation de la superficie agricole) comme indicateur de la pression de l'agriculture sur les forêts. Dans les cas où la superficie forestière totale a augmenté, les valeurs de déforestation ont été fixées à zéro.

La modélisation de la déforestation en fonction de l'évolution des surfaces agricoles explique la baisse des taux de déforestation dans le scénario de référence, car les taux annuels d'expansion des terres jusqu'en 2050 devraient être inférieurs aux taux observés pour les années de référence 2005-2009.

La modélisation de la déforestation de cette manière capture donc la pression de l'augmentation des terres sur les forêts dans les pays où la déforestation est un problème, en supposant une dynamique similaire à celle de la base de référence. Elle complète ainsi la variable d'occupation des terres qui capte la demande de terres, indépendamment de leur provenance dans un pays spécifique. En particulier pour les augmentations plus importantes de l'occupation des terres, cette approche peut sous-estimer la déforestation, car une grande partie de ces terres supplémentaires devraient probablement provenir des forêts, étant donné l'hypothèse de zones de prairies constantes. Une évaluation plus détaillée de la dynamique de la déforestation dans le cadre d'une demande accrue de terres cultivées nécessiterait de combiner des données sur l'adéquation des prairies, des forêts et d'autres zones pour la production de divers types de cultures, ce qui dépasse toutefois le cadre du présent document.

Érosion du sol : L'érosion du sol a été basée sur les données relatives aux quantités de sol perdues (tonnes de sol par hectare et par an) par l'érosion hydrique sur une base nationale²⁶. En raison du manque de données, l'érosion éolienne n'a pas été incluse. Les taux d'érosion du sol par hectare ont ensuite été combinés à un indice de susceptibilité du sol pour différentes cultures afin de différencier les cultures présentant des risques d'érosion du sol plus ou moins élevés. Cet indice a été fixé à 0 pour les prairies permanentes, à 1 pour les cultures avec une courte période de jachères nues et à 2 pour les cultures avec de plus longues périodes de jachères nues comme le maïs ou les betteraves. Cette classification est basée sur des consultations d'experts et la littérature⁷¹⁻⁷⁷. Les teneurs en matière organique du sol, en moyenne plus élevées dans l'agriculture biologique, sont susceptibles de réduire les taux d'érosion du sol^{78,79}. Cependant, afin de produire des estimations conservatrices au niveau mondial, nous n'avons pas pris en compte cet impact dans notre modèle. Les différences potentielles en matière d'érosion des sols entre les systèmes biologiques et conventionnels résultent donc de l'allocation de surfaces différentes aux différentes cultures, modifiant ainsi les parts relatives de cultures plus ou moins sensibles à l'érosion.

Table 1 Overview of model assumptions for the various scenarios			
Parameter	Base year	Reference scenario	Scenario assumptions on organic shares (from 0 to 100%), food wastage reduction (0, 25, 50%) and livestock feed and animal numbers (reductions in food-competing feed from 0 to 100% and corresponding reduction in animal numbers)
Year	2005–2009	2050	2050
Human population	FAOSTAT	FAOSTAT	As in the reference scenario.
Calorie and protein supply per person	FAOSTAT	Alexandratos and Bruinsma 2012 ⁷	Calorie supply equal to the reference scenario (if no food wastage reduction takes place); these numbers report the total domestically available amounts, <i>including</i> amounts that are lost due to food wastage; for comparison, scenarios with constant protein intake are also assessed. With food wastage reduction, calorie/protein supply is reduced accordingly.
Food wastage	Food wastage footprint	Food wastage footprint	Relative reduction according to the scenario (25% or 50%).
Share of livestock products in human diets	FAOSTAT	Alexandratos and Bruinsma 2012 ⁷	Model-endogenous calculation of the fraction of livestock-based food energy in total food energy supplied by the food system.
Crop yields	FAOSTAT	Alexandratos and Bruinsma 2012 ⁷	Lower organic yields according to the yield gaps from the literature (sensitivity analysis: 8–25% lower on aggregate levels).
Livestock yields	FAOSTAT	Alexandratos and Bruinsma 2012 ⁷	Based on reference scenario but yields decrease by up to 20% with zero feed from human-edible products and crops from arable land, due to suboptimal feed composition. As a sensitivity analysis, scenarios are also calculated for 0% and up to 40% yield reductions. Results presented in the paper report a mid-range estimate of 20% reduced yields with reductions in food-competing feed.
Yield increases	n.a.	Alexandratos and Bruinsma 2012 ⁷	Percentages increase as in the reference scenario (also for organic). A sensitivity analysis based on projections of climate change impacts on yields is included. The yield gap (cf. above) for organic production is then applied on these increased yields for conventional production in 2050.
Increase in cropping intensity	n.a.	Alexandratos and Bruinsma 2012 ⁷	As in the reference scenario.
Legume shares	FAOSTAT	Alexandratos and Bruinsma 2012 ⁷	Increased legume shares till 20% for 100% conversion to organic production or for 100% conversion to feeding rations without food-competing feed; in combinations, the higher legume share of those two changes is used, thus assuring a minimum level of 20% legumes in the crop rotations for 100% conversion to organic production.
Ratio arable land/grassland	FAOSTAT	Alexandratos and Bruinsma 2012 ⁷ (net grassland stays constant, arable land increases)	Net grassland is kept constant as in the reference scenario; arable land change according to the amount of calories/protein supply.
Ruminant numbers	FAOSTAT	Alexandratos and Bruinsma 2012 ⁷	Model-endogenous calculation of the number of animals that can be fed on available feed.
Non-ruminant numbers	FAOSTAT	Alexandratos and Bruinsma 2012 ⁷	Model-endogenous calculation of the number of animals that can be fed on available feed.
Share of feed types in feeding rations	Herrero et al. 2013 ⁸⁰	As in the base year	Based on rations for base year and reference scenario but adapted according to feed supply of human-edible products and crops from arable land dropping gradually to 0%.
Utilization shares	FAOSTAT	Alexandratos and Bruinsma 2012 ⁷	Feed share of primary food crops reduced (0% for 100% reduction of feed from human-edible products and crops from arable land).
Deforestation	FAOSTAT	Increased land areas increase deforestation, using the land areas forecasted and deforestation rates from FAOSTAT	If more/less land is needed to satisfy food availability, pressure on forests increases/decreases.

Tableau 1 Aperçu des hypothèses du modèle pour les différents scénarios			
Paramètres	Années de bases	Scénarios références	Hypothèses de scénarios concernant la part de l'agriculture biologique (de 0 à 100 %), la réduction du gaspillage alimentaire (0, 25, 50 %), l'alimentation du bétail et le nombre d'animaux (réduction de l'alimentation concurrente de 0 à 100 % et réduction correspondante du nombre d'animaux).
Année	2005 - 2009	2050	2050

Population humaine	FAO STAT	FAO STAT	Comme dans le scénario de référence.
Calories & Protéines	FAO STAT	Alexandratos and Bruinsma 2012 ⁷	Apport calorique égal au scénario de référence (si aucune réduction du gaspillage alimentaire n'a lieu) ; ces chiffres indiquent les quantités totales disponibles au niveau national, y compris les quantités perdues en raison du gaspillage alimentaire ; à des fins de comparaison, des scénarios avec un apport constant en protéines sont également évalués. En cas de réduction du gaspillage alimentaire, l'apport calorique/protéique est réduit en conséquence.

Description des scénarios. Sur la base d'une évaluation de (i) la situation actuelle ("année de référence"), qui correspond à la situation moyenne pour 2005-2009 fournie par FAOSTAT, et de données supplémentaires²⁶, les scénarios suivants sont calculés dans le modèle SOL : pour 2050(ii) le scénario de référence de la FAO⁷ ; le scénario de référence sert de base pour(iii) les scénarios prévoyant une part croissante de production biologique, jusqu'à une version à 100%. En outre, des scénarios sont évalués en supposant une augmentation de la production biologique combinée à une réduction du gaspillage alimentaire de 25 et 50 % par rapport aux valeurs régionales et par groupe de produits de la FAO¹⁰ (cette dernière valeur de 50 % faisant partie des objectifs de développement durable pour 2030), et à une réduction de l'offre de produits animaux, modélisée par une réduction de 50 et 100 % des aliments concurrents. La réduction de 100 % suppose une production de ruminants entièrement nourris à l'herbe, et des monogastriques nourris uniquement de sous-produits de la production alimentaire²⁶. Les scénarios étudiés dans le SOL-modèle prennent le scénario de référence comme point de départ et émettent des hypothèses supplémentaires sur des parties spécifiques d'intérêt (tableau 1). Le modèle SOL calcule ensuite les intrants, les extrants et les incidences environnementales de toutes les activités de culture et d'élevage, sur la base de ces hypothèses supplémentaires. Pour tous les scénarios, nous évaluons la disponibilité alimentaire (exprimée en calories et en protéines par personne et par jour), les habitudes alimentaires, l'occupation des sols, le nombre d'animaux et une série d'impacts environnementaux tels que l'excédent N et l'excédent P (c'est-à-dire la différence nette entre les flux entrants et sortants de N/P), l'utilisation de l'eau, la déforestation et les émissions de GES.

ous les scénarios sont ensuite évalués par rapport au scénario de référence. Pour cela, l'une des trois conditions suivantes est retenue : les scénarios doivent fournir la même quantité de calories ou de protéines pour l'alimentation, ou utiliser la même superficie de terres cultivées et de prairies que le scénario de référence. Seulement dans le cas des scénarios avec réduction du gaspillage, la quantité totale de calories ou de protéines à produire a été réduite en conséquence. Ces conditions sont imposées par pays. Pour ce faire, on modifie à la hausse ou à la baisse les surfaces cultivées, la production et les quantités disponibles sur le marché intérieur en fonction de cet objectif (les surfaces en herbe étant maintenues constantes). Les modèles pour les différents produits restent ainsi aussi proches que possible du modèle observé dans le scénario de référence (c'est-à-dire les parts relatives entre les groupes de produits et entre les produits à l'intérieur de ces groupes). Des changements dans certains de ces modèles sont cependant inévitables dans plusieurs scénarios, par exemple si la part des légumineuses augmente et que les parts des produits animaux diminuent. Toutefois, si la consommation de viande peut diminuer dans un scénario, la part relative de la viande de poulet et de porc est maintenue au niveau du pays, tout comme les parts relatives des différentes légumineuses sont maintenues au niveau du pays lorsque les parts totales de légumineuses augmentent.

Les principaux résultats du document sont présentés avec la condition de calories identiques, car elle est la plus illustrative pour capturer les aspects de disponibilité alimentaire qui sont au centre de l'intérêt, et car les résultats montrent que les scénarios répondant à la condition de calories identiques produisent toujours la même quantité de protéines ou une quantité plus élevée que le scénario de référence et sont donc adéquats dans l'approvisionnement en protéines. Ceci est dû à la part plus importante de légumineuses dans la production biologique et aux rendements biologiques plus faibles pour les céréales et autres cultures de base pour l'apport calorique. Le tableau 1 donne un aperçu des scénarios calculés et d'autres informations sont fournies par la suite et dans la littérature sur le modèle SOL26.

La condition générale de produire la même quantité de calories ou de protéines que dans le scénario de référence est choisie pour assurer la comparabilité de la viabilité et des impacts des différents scénarios avec le scénario de référence. Il est clair que pour de nombreux pays, ces quantités sont très élevées et on peut légitimement se demander si fournir de telles quantités de nourriture est une stratégie utile et réaliste ; ceci est partiellement pris en compte dans les scénarios qui incluent des réductions du gaspillage alimentaire. Pour d'autres pays, les quantités prévues se situent clairement dans la fourchette basse et devraient être augmentées pour des raisons de sécurité alimentaire. Étant donné que la quantité totale de calories et de protéines disponibles dans le monde est suffisante pour nourrir 9 milliards de personnes, différentes hypothèses sur le commerce et sur les quantités disponibles au niveau national dans les scénarios de référence pourraient en principe résoudre ces problèmes. Tout cela n'est pas abordé dans les scénarios présentés ici, pour les raisons de comparabilité mentionnées ci-dessus.

Les quantités de produits dans les scénarios sont dérivées des quantités indiquées dans le scénario de référence, en adaptant certaines quantités de produits en fonction des hypothèses du scénario : (a) la production biologique avec des rendements inférieurs entraîne une réduction des quantités provenant des mêmes zones ; (b) la réduction du gaspillage entraîne une réduction de la production ; (c) la réduction des aliments concurrents des aliments pour animaux entraîne une diminution du nombre d'animaux pouvant être nourris avec ces aliments et donc une diminution des produits animaux pouvant être obtenus à partir de ces aliments ; (d) les zones qui deviennent libres en raison de la réduction de la production d'aliments pour animaux sont cultivées avec d'autres cultures en fonction de leur répartition relative dans la production nationale ; (e) la part des légumineuses est augmentée en fonction de la part de la production biologique ou de la réduction des aliments concurrents des aliments pour animaux (jusqu'à 20 %). Les surfaces utilisées à cet effet sont prélevées proportionnellement sur toutes les autres surfaces de la production nationale.

Pour tous les produits, les mêmes parts d'utilisation et les mêmes ratios d'importation et d'exportation que dans le scénario de référence sont ensuite appliqués pour obtenir les quantités disponibles au niveau national (l'utilisation des produits de base pour l'alimentation animale est réduite en fonction des changements requis pour la réduction des aliments concurrents des aliments, si cela fait partie du scénario). Pour chaque pays, l'apport total de calories alimentaires par habitant dérivé de cette quantité disponible au niveau national est ensuite mis à l'échelle pour être égal à l'apport de calories alimentaires du scénario de référence. Le même facteur d'échelle est ensuite appliqué à la production totale de ce pays. Cette approche reproduit donc les modèles de production et d'échange (concernant les quantités relatives des différents produits) du scénario de référence aussi fidèlement que possible, compte tenu des hypothèses spécifiques du scénario pour permettre une comparaison transparente des changements physiques liés aux différents scénarios. En cela, le modèle SOL n'est explicitement pas un modèle économique, car les changements de production ne sont pas gouvernés par un module commercial explicite avec des élasticités de prix (croisées), mais par des hypothèses directes sur les parts relatives des différents produits. Cela permet une évaluation transparente de la viabilité physique et agronomique des scénarios par rapport au scénario de référence et n'implique pas de projections sur la façon dont le commerce alimentaire mondial s'adapterait aux changements définissant les scénarios.

Les apports d'engrais aux cultures sont déterminés comme suit : Tout d'abord, l'utilisation d'engrais minéraux N spécifique au pays, telle qu'elle est rapportée dans le scénario de référence, est allouée aux différentes activités agricoles en fonction de leur demande et un rapport offre/demande spécifique à la culture est alors dérivé. Dans les scénarios, les engrais minéraux sont appliqués aux cultures conventionnelles en utilisant ce même rapport offre/demande. Les cultures biologiques ne reçoivent pas d'engrais minéraux azotés. Les résidus de culture et le fumier sont ensuite appliqués proportionnellement à la demande d'azote restante après avoir pris en compte ces

applications d'engrais minéraux. Ainsi, on suppose qu'une part de 50 % du fumier reste sur les prairies. La fixation de l'azote est un apport d'engrais pour les cultures de légumineuses uniquement, car l'azote fixé par les légumineuses et appliqué à d'autres cultures est couvert par les résidus de culture des légumineuses. L'apport de P organique est ensuite dérivé des quantités de résidus de culture et de fumier et des teneurs en P respectives. L'apport de P organique est ensuite dérivé des quantités de résidus de culture et de fumier et de leurs teneurs respectives en P. Les apports de P minéral sont également tirés des données du scénario de référence au niveau national et sont ensuite alloués aux différentes cultures en fonction de la demande restante après la prise en compte de ces apports de P provenant de sources organiques.

Disponibilité des données. Le code du modèle et les données utilisées sont accessibles dans le dossier 'MullerEtAl_NCOMMS2017'atpaper.fibl.ch.

Reçu : 26 février 2016 **Accepté :** 15 septembre 2017