

DURABILITÉ DES SYSTÈMES POUR LA SÉCURITÉ ALIMENTAIRE

Combiner les approches locales et globales

A. Thomas, A. Alpha, A. Barczak, N. Zakhia-Rozis, coord.



Chapitre 5

Régimes alimentaires et changement d'usage des terres à l'échelle globale : l'importance du cadre de modélisation

Patrice Dumas, Agneta Forslund, Chantal Le Mouël

Les changements de régime alimentaire à travers le monde ont des conséquences importantes sur les usages des terres et, plus largement, sur les impacts de l'agriculture sur l'environnement au niveau global. La demande agricole totale est en effet majoritairement déterminée par l'évolution de la population et des régimes alimentaires qui, à travers l'ajustement de l'offre, détermine les ressources utilisées pour la production agricole.

Les conséquences environnementales des changements de régime alimentaire à l'échelle globale sont évaluées par nombre d'études, sous l'angle du changement d'usage des terres (Paillard *et al.*, 2011 ; Erb *et al.*, 2016 ; Mora *et al.*, 2020), des conséquences en matière d'intensification de l'agriculture (Brunelle *et al.*, 2015), des émissions de gaz à effet de serre (GES) (voir entre autres Stehfest *et al.*, 2009 ; Hedenus *et al.*, 2014 ; Searchinger *et al.*, 2019 ; Clark *et al.*, 2020) ou de l'évolution de la biodiversité (Henry *et al.*, 2019). Les effets des changements de diète sur les prix (Stevanović *et al.*, 2017) ou la santé (Willett *et al.*, 2019) ont également été analysés.

Ces études montrent que les régimes alimentaires ont une importance cruciale au regard de l'impact de l'agriculture sur l'environnement, et que la part des produits animaux dans les diètes, en particulier les produits issus des ruminants, est déterminante. De nombreuses études mettent en avant les effets bénéfiques en matière de santé humaine et d'environnement d'une transition vers des régimes plus sains, avec plus de diversité, plus de légumineuses, de fruits et légumes, et moins de produits animaux, de sucre et d'huiles, au moins pour les pays émergents et développés.

Les évaluations de l'ampleur des conséquences de ces transitions, à l'échelle globale, sont nettement plus divergentes (voir, par exemple, Le Mouël et Forslund, 2017, sur l'usage des terres, et Prudhomme *et al.*, 2020a, sur les émissions de GES). Des différences dans les hypothèses des scénarios évalués expliquent une partie de ces divergences, mais le type de modèle et les choix de modélisation jouent également un rôle. C'est particulièrement visible lorsque les conséquences environnementales

et économiques sont évaluées en utilisant les mêmes scénarios, tels les SSP-RCP⁴ et plusieurs modèles, en particulier des modèles intégrés (Popp *et al.*, 2017). L'utilisation de sources de données et de paramètres variés explique pour partie ces résultats divergents, mais les différences entre approches de modélisation sont également cruciales (Prudhomme *et al.*, 2020a). Lorsque plusieurs modèles intégrés différents sont utilisés pour simuler les mêmes scénarios, l'importance des cadres de modélisation est, le plus souvent, mentionnée, mais pas analysée. De façon générale les études se focalisent sur les moyennes ou les médianes, sans analyser l'ensemble des informations générées par les modèles. L'étude de von Lampe *et al.* (2014) fait figure d'exception, les différences entre modèles y étant à la fois présentées et analysées.

Ici, nous préconisons une plus grande transparence lorsque des résultats de simulation obtenus à partir de différents modèles sont présentés. Se focaliser sur les moyennes ou les médianes cache la fragilité et les incertitudes associées. En revanche, montrer quels mécanismes présents dans les différents modèles contribuent aux différences dans les résultats permet de mieux comprendre et interpréter les résultats des modèles et d'éclairer le débat scientifique.

En nous concentrant sur les conséquences des changements de régime alimentaire sur les usages des terres, nous montrons comment et dans quelle mesure les cadres de modélisation peuvent influencer les résultats des simulations. Ce sont les mécanismes à l'œuvre dans les différents modèles et leur influence sur les résultats qui sont au centre de l'étude, mécanismes que nous examinons en simulant les effets sur l'usage des terres de quatre diètes contrastées avec trois modèles fondés sur des principes différents.

Le nombre de modèles utilisés est relativement restreint par rapport à un exercice typique d'intercomparaison de modèles (von Lampe *et al.*, 2014⁵). Cependant, un modèle de bilan n'intégrant ni comportement économique des agents ni prix est considéré, ce qui élargit considérablement le spectre des cadres de modélisation analysés. De plus, travailler avec moins de modèles permet d'aller plus loin dans l'harmonisation de la traduction des scénarios en variables d'entrée de chaque modèle, et ainsi d'être plus à même d'isoler les effets des mécanismes dans l'explication des différences entre résultats.

►► Trois cadres de modélisation contrastés

Les trois modèles considérés sont GlobAgri, un modèle de bilan de flux de produits agricoles, et deux modèles d'équilibre partiel de marchés, MATSIM-LUCA (Market And Trade SIMulation model for Land-Use Change Analysis) et NLU (Nexus Land Use).

4. Dans le cadre du Giec (Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat), un ensemble de scénarios communs est utilisé, combinant des scénarios décrivant les conditions socio-économiques, les SSP (*shared socio-economic pathways*), et des scénarios correspondant à différents futurs pour le climat, les RCP (*representative concentration pathways*).

5. von Lampe *et al.* (2014) mène un exercice de comparaison considérant 10 modèles intégrés, avec différentes caractéristiques, différentes résolutions spatiales et différents niveaux de désagrégation de l'agriculture, dont six modèles d'équilibre général (AIM, ENVISAGE, EPPA, FARM, GTEM, MAGNET) et quatre modèles d'équilibre partiel du secteur agricole (GLOBIOM, IMPACT, MagPIE, GCAM).

GlobAgri, un modèle de bilan de flux

GlobAgri est un modèle de bilan des flux de biomasse, qui utilise en entrée les données de FAOStat et de sources complémentaires pour l'élevage, les flux d'azote et les émissions de GES. Le principe de ce type de modèle est d'assurer que les ressources (production et importations) sont égales aux usages (alimentation humaine et animale, autres usages et exportations), pour chaque produit dans chaque pays ou groupe de pays (que l'on appellera par la suite région). Les importations de chaque produit sont une fonction linéaire de la somme des usages, et les exportations sont représentées comme une part constante de la taille du marché mondial (c'est-à-dire, de la somme des importations de toutes les régions). La demande d'aliments pour les animaux est proportionnelle à la production des différents types d'animaux.

Un changement de régime alimentaire impacte la demande, qui à son tour détermine les importations et les exportations. La production domestique s'ajuste et, lorsqu'il s'agit d'un produit animal, impacte la demande d'aliments pour les animaux qui vient s'ajouter à la demande humaine. Enfin, les ajustements des productions domestiques des différents produits provoquent des changements d'usage des terres sur la base des rendements des cultures et des pâtures⁶. Le bilan des flux d'azote et les émissions de GES peuvent également être calculés par GlobAgri. Ce cadre de modélisation a été utilisé pour l'évaluation quantitative de plusieurs prospectives, soit à l'échelle du monde (Le Mouël *et al.*, 2018a), soit avec un focus particulier sur certaines régions (Le Mouël *et al.*, 2023), et pour l'estimation des émissions de GES de différentes options pour l'agriculture et les systèmes alimentaires mondiaux (Searchinger *et al.*, 2019).

La version de GlobAgri utilisée ici correspond à celle de Le Mouël *et al.* (2018b), utilisée pour la prospective Agrimonde-Terra (Le Mouël *et al.*, 2018a), avec 2008 comme année de référence (moyenne de 2007-2009), 14 régions et 33 agrégats de produits agricoles. Le cadre générique de modélisation est appelé GlobAgri, tandis que la version particulière utilisée est plus spécifiquement nommée GlobAgri-DietsAgT.

MATSIM et NLU, deux modèles économiques

MATSIM-LUCA est un modèle d'équilibre partiel des marchés agricoles à l'échelle mondiale. Comme dans la plupart des modèles de ce type, une fonction d'offre dépendante des prix est confrontée à un ensemble de fonctions de demande (pour l'alimentation humaine, animale et pour les autres usages), également sensibles aux prix, pour chaque produit et dans chaque région. La demande alimentaire, en particulier, et donc les régimes alimentaires sont endogènes, la consommation de chaque produit dépendant des préférences des consommateurs et des prix relatifs sur les marchés. Les technologies de production et les marchés de la terre et des autres intrants sont représentés explicitement dans MATSIM, en utilisant des fonctions à

6. Les contraintes sur les terres disponibles peuvent également être prises en compte dans GlobAgri, avec des ajustements du commerce international. Dans la version utilisée ici, ces contraintes ne sont pas prises en compte, et les surfaces s'ajustent librement.

élasticité de substitution constante (pour les demandes) et des fonctions à élasticité de transformation constante (pour l'offre). Les rendements des cultures sont donc endogènes et sensibles aux prix, un changement dans le prix d'un produit cultivé induisant un ajustement du mix optimal terre-autres intrants utilisé pour produire cette culture. Les prix de la terre et des autres intrants s'ajustent à leur tour, affectant la production des autres cultures. De façon similaire, le changement du prix d'un produit animal entraîne une réallocation dans le mix des différents aliments pour le bétail (herbe, concentrés et autres produits) utilisé pour produire ce produit animal, entraînant une modification des prix des aliments pour bétail et induisant des modifications de la composition des rations dans les autres secteurs d'élevage. De la même façon que pour les cultures, l'efficacité des différents secteurs d'élevage est endogène et sensible aux prix. Une exception, dans MATSIM, est le rendement des pâtures qui est exogène et n'est pas sensible aux prix, situation que l'on retrouve dans GlobAgri-DietsAgT. Dans ce dernier, par hypothèse, les rendements des cultures et les efficacités des productions animales sont, par contre, également exogènes.

MATSIMU-LUCA fait l'hypothèse d'un marché mondial intégré, ce qui se traduit par le fait que chaque région exporte son surplus ou importe son déficit domestique d'un produit (calculé comme l'écart entre offre et demande domestiques, soit exportations nettes, positives en cas de surplus et négatives en cas de déficit) d'un pot commun mondial sans tenir compte de l'origine du produit. Le prix mondial permet d'équilibrer le marché international de chaque produit en annulant la somme des exportations nettes de toutes les régions. Les politiques commerciales sont représentées *via* des équations de transmission entre le prix mondial et le prix intérieur de chaque produit.

L'année de référence est 2009, les projections se font à l'horizon 2030, pour 17 régions et plus de 40 produits agricoles et de biomasse énergie. MATSIM-LUCA est décrit en détail dans Levert *et al.* (2017). Ce modèle a été utilisé pour évaluer les conséquences du déploiement de la biomasse énergie en France et dans l'Union européenne (Forslund *et al.*, 2013) et pour quantifier les conséquences environnementales des politiques françaises touchant aux produits laitiers (Salou *et al.*, 2019).

NLU est également un modèle d'équilibre partiel des marchés agricoles à l'échelle mondiale, mais il diffère de MATSIM-LUCA sur plusieurs mécanismes importants. Tout d'abord, la demande alimentaire est exogène, de même que le niveau absolu du commerce des produits issus des monogastriques. Ensuite, la représentation de l'offre est différente, que ce soit pour les cultures ou pour l'élevage. La modélisation de l'intensification agricole dans NLU est en effet construite autour de la substitution entre la terre et les fertilisants pour ce qui concerne les cultures, et la substitution entre différents systèmes de production de ruminants utilisant des proportions variées d'herbe, de concentrés et de résidus et de fourrages dans les rations, pour l'élevage. Le modèle est résolu par la minimisation du coût total de la production agricole à l'échelle de grandes régions tout en assurant l'équilibre offre-demande sur les marchés, les produits agricoles étant mesurés en équivalent énergie. Plusieurs classes de terre sont considérées. Elles sont définies sur la base de leur rendement potentiel simulé avec le modèle de culture LPJmL (Lund-Potsdam-Jena managed Land), ce dernier prenant en compte l'hétérogénéité des conditions pédoclimatiques. Les taux de déforestation sont exogènes, les changements de

surface agricole totale par région sont donc prédéterminés. Les rendements de la culture représentative dans chaque classe de terre dépendent de façon non linéaire de la quantité d'intrants utilisés, tandis que la production des produits animaux est linéairement reliée à la quantité d'aliments ingérés par le bétail. La productivité du secteur de l'élevage à l'échelle régionale s'ajuste de façon endogène, par la réallocation des cultures sur les classes de terre et les basculements entre systèmes pastoraux et systèmes mixtes culture-élevage de ruminants. Le rendement moyen de production d'herbe est ainsi endogène, à la différence de MATSIM-LUCA.

Une description détaillée de NLU a été publiée dans Souty *et al.* (2012), et la méthode de calibration est détaillée dans Souty *et al.* (2013). Le monde est divisé en 12 grandes régions et cinq produits agricoles sont représentés. NLU a été utilisé pour évaluer les conséquences de changements des prix des fertilisants sur l'intensification agricole (Brunelle *et al.*, 2015), les politiques climatiques du secteur agricole (Prudhomme *et al.*, 2020b) et les conséquences au niveau mondial de scénarios d'augmentation de la production des légumineuses en Europe (Prudhomme *et al.*, 2020a).

Trois approches de modélisation bien distinctes

Les trois modèles ont des points communs, mais également des différences. Le cadre de modélisation de GlobAgri ne permet pas de substitution entre produits et entre intrants, et les structures de production, de consommation et d'échanges sont plutôt rigides. MATSIM est le plus flexible, la demande, l'offre et le commerce étant sensibles aux prix, tandis que NLU est intermédiaire, l'offre étant relativement flexible, mais la demande alimentaire exogène et les quantités échangées sur les marchés mondiaux étant constantes pour certains produits. La représentation des systèmes de production est assez différente dans les trois modèles, avec des rendements et des efficacités plus ou moins endogènes et sensibles aux prix. Dans GlobAgri, les rendements des cultures et les efficacités animales sont exogènes, décidés en dehors du modèle, en général comme partie intégrante du scénario simulé. Dans MATSIM et NLU, les rendements et les efficacités animales sont endogènes et répondent aux prix, à l'exception des rendements des prairies permanentes qui sont exogènes dans MATSIM. Dans NLU, la réponse des rendements des cultures aux intrants prend en compte certaines contraintes biophysiques, ce qui limite l'ajustement des rendements par rapport à MATSIM.

►► Les scénarios

Les hypothèses de changements de régime alimentaire

Quatre scénarios de régime alimentaire sont évalués à l'horizon 2050, trois étant issus de la prospective Agrimonde-Terra (Animp, Ultrap et Healthy), le quatrième (FAO) étant un scénario de prolongement des tendances de type « *business as usual* ».

Les hypothèses de prolongement des tendances actuelles dans le scénario FAO donnent lieu à une stabilisation de l'apport calorique total et de la part des produits

animaux dans les pays développés, tandis que dans les pays en développement et émergents, les régimes deviennent plus riches en calories et en produits animaux. Dans toutes les régions, les produits provenant des ruminants sont substitués par ceux issus des monogastriques. L'importance des huiles végétales et des sucres augmente de façon générale dans les régimes alimentaires. Le scénario FAO se base sur Alexandratos et Bruinsma (2012) pour GlobAgri-DietsAgt et NLU, et sur OECD-FAO World Agricultural Outlook (2014) pour MATSIM⁷.

Le scénario Animp relève de l'hypothèse de « Transition vers des régimes alimentaires basés sur les produits animaux correspondant à une consommation de type urbain » d'Agrimonde-Terra. Les changements sont similaires à ceux du scénario FAO, mais beaucoup plus marqués dans les pays émergents et en développement, la part des produits animaux, et en particulier de la viande, augmentant fortement dans les régimes alimentaires.

Le scénario Ultrap correspond à l'hypothèse de « Transition vers des aliments ultra-transformés » d'Agrimonde-Terra. De nouveau, les changements sont similaires à ceux du scénario FAO, mais avec une transition vers plus de produits ultra-transformés dans toutes les régions du monde. Les régimes alimentaires de ce scénario sont riches en huiles végétales, sucres, sel et viande de volaille, l'augmentation de la part de produits animaux étant similaire à celle du scénario FAO, et donc significativement moindre que pour le scénario Animp.

Le scénario Healthy reprend l'hypothèse « Régimes sains diversifiés » d'Agrimonde-Terra, une transition profonde des systèmes alimentaires s'opérant vers des régimes alimentaires plus équilibrés, plus divers et, *in fine*, plus sains. La disponibilité alimentaire totale par tête diminue dans les pays développés, diminue ou stagne dans les pays émergents, et stagne ou s'accroît dans les pays en développement, afin d'atteindre les niveaux recommandés. La part de produits animaux décroît dans les régimes alimentaires de toutes les régions, sauf en Inde et en Afrique subsaharienne, où elle croît pour atteindre les niveaux recommandés. La place des huiles végétales, des sucres et du sel décroît fortement, tandis que celle des fruits et légumes, des céréales secondaires et des légumineuses s'accroît significativement.

Les hypothèses quantitatives des régimes alimentaires d'Agrimonde-Terra sont détaillées dans Le Mouël *et al.* (2018a).

Les hypothèses sur les autres variables

GlobAgri-DietsAgT et NLU utilisent les projections de la FAO en 2050 pour les changements de rendement (sauf pour les cultures dynamiques dans NLU), d'intensité culturale et de production de biomasse énergie. Les hypothèses de MATSIM sur les rendements et les usages non alimentaires (qui incluent la biomasse énergie) proviennent des projections OECD-FAO (World Agricultural Outlook, 2014). Les trois modèles utilisent des projections similaires sur les efficacités de l'élevage (issues de Bouwman *et al.*, 2005).

7. Les projections du World Agricultural Outlook (2014) de l'OECD-FAO couvrent la période 2014-2023, elles sont extrapolées linéairement jusqu'en 2030 pour être utilisées dans MATSIM.

Des hypothèses additionnelles sont faites pour NLU. Tout d'abord, les taux de reforestation et de déforestation sont la continuation des tendances passées, avec un arrêt de la reforestation en 2022. Les changements d'efficacité des intrants sont mis en cohérence avec les données sur l'efficacité de la fertilisation azotée de Alexandratos et Bruinsma (2012). Enfin, les rendements potentiels, qui déterminent les classes de terre, sont constants.

Pour pouvoir comparer les résultats des modèles, des ajustements spécifiques doivent être faits pour NLU et MATSIM. L'année de référence de NLU est 2001, et pour être en cohérence avec les autres modèles dont l'année de référence est proche de 2010, les régimes alimentaires sont projetés entre 2001 et 2010 en utilisant les projections de la FAO. Pour ce qui concerne MATSIM, les résultats des simulations ont été extrapolés linéairement de 2030 à 2050, et remis à l'échelle avec un facteur de proportionnalité pour que les surfaces agricoles considérées dans MATSIM (qui ne couvrent pas certains produits agricoles) correspondent à celles de GlobAgri-DietsAgT et de NLU (qui couvrent tous les produits agricoles).

► Résultats

Dans les quatre scénarios, les surfaces agricoles augmentent entre l'année de référence et 2050 (tableaux 5.2 et 5.3). Cependant, l'ampleur des changements est très différente d'un scénario à l'autre, ce qui reflète l'importance des régimes alimentaires pour l'usage des terres, et entre modèles, ce qui met en exergue l'effet des cadres de modélisation. Pour comprendre les effets des régimes, les résultats de GlobAgri-DietsAgT sont analysés dans un premier temps, car étant les plus simples à interpréter. Dans un deuxième temps est examiné le rôle des cadres de modélisation.

Les conséquences des régimes alimentaires sur les usages des terres : comparaison des scénarios

Pour GlobAgri-DietsAgT, l'ampleur du changement d'usage des terres dépend directement de la quantité d'énergie totale du régime et de la part de produits animaux. Les résultats sont présentés dans les tableaux 5.1 et 5.2. Ils indiquent que le scénario Animp, qui implique les régimes les plus riches en matière d'énergie totale et contenant une part très importante de produits animaux, conduit à l'expansion la plus importante des surfaces agricoles, avec + 406 millions d'hectares de surfaces de cultures et + 4 055 millions d'hectares de surfaces de pâtures. Le scénario FAO induit également une expansion agricole importante, mais significativement moindre, + 189 millions d'hectares pour les cultures et + 1 995 millions d'hectares pour les pâtures, les régimes alimentaires de ce scénario étant similaires en matière d'énergie disponible mais moins riches en produits animaux que ceux du scénario Animp. Les régimes alimentaires du scénario Ultrap sont assez proches de ceux du scénario FAO, tant en ce qui concerne l'énergie totale disponible que la part de produits animaux. Cependant, les huiles végétales, les sucres et la viande de volailles y sont

nettement plus présents, ces trois catégories de produits étant très performantes quant à la production d'énergie par hectare. Ainsi, le scénario Ultrap requiert peu de terre, avec une diminution des surfaces de culture (- 22 millions d'hectares) et un accroissement limité des surfaces de pâtures (+ 243 millions d'hectares). Enfin, le scénario Healthy produit des résultats médians, avec + 101 millions d'hectares pour les cultures et + 608 millions d'hectares pour les pâtures, sous l'influence de deux effets de sens opposé. Tout d'abord, comme les régimes alimentaires du scénario Healthy sont moins riches en énergie totale et en produits animaux, au niveau mondial et en moyenne, l'expansion agricole est réduite. Cependant, pour certains pays en développement ou émergents, et notamment pour l'Inde et l'Afrique, ce scénario implique des régimes à contenu plus fort en énergie et en produits animaux que les autres scénarios. Ces régions étant très peuplées, en forte croissance démographique, et plutôt moins performantes au niveau des rendements des cultures et des efficacités des élevages, les régimes du scénario Healthy entraînent des augmentations importantes de surfaces agricoles dans ces régions.

Tableau 5.1. Évolution des surfaces de cultures mondiales (de l'année de référence à 2050, en millions d'hectares).

Scénario	Modèle	GlobAgri-DietsAgT	MATSIM	NLU
Animp		+ 406	+ 76	+ 634
FAO		+ 189	+ 113	+ 436
Healthy		+ 101	+ 148	+ 75
Ultrap		- 22	+ 146	+ 290

Tableau 5.2. Évolution des surfaces de pâtures mondiales (de l'année de référence à 2050, en millions d'hectares)

Scénario	Modèle	GlobAgri-DietsAgT	MATSIM	NLU
Animp		+ 4055	+ 430	- 327
FAO		+ 1995	+ 350	- 129
Healthy		+ 608	+ 291	+ 230
Ultrap		+ 243	+ 343	+ 17

Les conséquences des régimes alimentaires sur les usages des terres : comparaison des modèles

Les changements d'usages des terres sont nettement moins forts avec MATSIM qu'avec GlobAgri-DietsAgT, ce que montrent les tableaux 5.1 et 5.2, en raison des effets-prix et des possibilités de substitution entre produits et entre intrants présents dans le modèle économique. Ces mécanismes redirigent la consommation vers les produits les moins chers (*via* les substitutions entre produits, y compris au travers des importations), et la production vers les intrants les moins coûteux (grâce aux substitutions entre produits, à l'ajustement des utilisations d'intrants et

aux changements de localisation de la production par les exportations). Ainsi, pour les mêmes niveaux de consommation, le besoin en surface est plus faible avec un modèle économique qu'avec un modèle de bilan. C'est particulièrement vrai pour MATSIM, car, d'une part, les rendements des cultures et les efficacités animales sont endogènes et, d'autre part, les marchés de la terre et des autres intrants sont représentés explicitement, avec pour conséquence un effet important de ces processus sur les résultats de simulation.

Ces mécanismes permettent d'expliquer les différences de changements d'usage des terres résultant des scénarios entre GlobAgri-DietsAgT et MATSIM (tableaux 5.1 et 5.2). Ainsi, par exemple, Animp provoque l'accroissement des surfaces de cultures le plus important avec GlobAgri-DietsAgT et le plus faible avec MATSIM. Dans MATSIM en effet, l'accroissement de la demande, et en particulier de la demande de produits animaux, exacerbe la compétition pour la terre, ce qui conduit à une augmentation significative des prix de la terre dans toutes les régions. Les producteurs y répondent en intensifiant leurs pratiques, en accroissant les rendements à l'hectare pour les cultures et les efficacités pour les produits animaux, ce qui diminue le besoin en terres. Le même processus est à l'œuvre dans le scénario Ultrap, mais, dans ce cas, et bien que les rendements augmentent, une expansion des surfaces de cultures reste nécessaire pour répondre à l'augmentation de la demande alimentaire. À l'inverse, le scénario Healthy conduit à un accroissement important des surfaces de cultures, l'augmentation modérée de la demande dans ce scénario induisant une hausse relativement faible des prix de la terre et par suite une augmentation moins importante des rendements (tableau 5.3).

Tableau 5.3. Taux de croissance annuel (%) du rendement par hectare sur les cultures et les pâtures par scénario et par modèle (moyenne mondiale, de l'année de référence à 2050¹).

Modèle	GlobAgri-DietsAgT		MATSIM		NLU	
	Cultures	Pâtures	Cultures	Pâtures	Cultures	Pâtures
Animp	+ 0,97	- 0,07	+ 1,5	+ 0,7	+ 0,34	+ 1,29
FAO	+ 0,97	- 0,07	+ 1,1	+ 0,7	+ 0,35	+ 0,82
Healthy	+ 0,97	- 0,02	+ 0,5	+ 0,7	+ 0,38	+ 0,14
Ultrap	+ 0,97	+ 0,26	+ 1,4	+ 0,7	+ 0,36	+ 0,35

¹ Le rendement moyen mondial en 2050 est calculé en reprenant la production de 2010 pour isoler l'effet « pur » des changements de rendement.

Pour ce qui concerne l'expansion des pâtures, l'ordre des scénarios est le même pour MATSIM que pour GlobAgri-DietsAgT. Cela n'est pas étonnant, car dans MATSIM, le mécanisme précédemment décrit d'intensification et d'augmentation des rendements à l'hectare n'existe pas pour l'herbe des pâtures, dont les rendements à l'hectare sont fixés de façon exogène. Les écarts de résultats en matière de surfaces de pâtures s'expliquent plutôt dans ce cas par des différences de localisation de l'élevage : dans MATSIM, la production peut se relocaliser facilement dans les régions où les efficacités et les rendements sont plus élevés, le commerce étant flexible, tandis que la structure du commerce est rigide dans GlobAgri-DietsAgT.

Les résultats de NLU se distinguent de ceux des deux autres modèles, même si les mécanismes clés sont, comme pour MATSIM, les processus d'intensification/extensification. En effet, dans NLU, le rendement moyen des pâtures est endogène, tandis que la modélisation de l'offre et du commerce limite les variations de rendement des cultures. Les augmentations de rendement des cultures sont ainsi plus faibles dans NLU que dans MATSIM quel que soit le scénario, tandis que les rendements moyens des pâtures sont plus importants pour les scénarios Animp et FAO (tableau 5.3). Avec MATSIM, Animp était le scénario utilisant le moins de surfaces de cultures et Healthy celui en utilisant le plus, la sensibilité des rendements des cultures aux prix étant importante dans ce modèle. Avec NLU, Animp utilise le moins de surfaces de pâtures et Healthy le plus de surfaces de pâtures, de la même façon en raison de la réponse aux prix des rendements moyens des pâtures. Par exemple, pour le scénario Animp, l'accroissement de la demande alimentaire, en particulier en produits ruminants, induit une augmentation de la part des systèmes mixtes agriculture-élevage dans la production au détriment des systèmes pastoraux. Comme la ration dans les systèmes mixtes est plus riche en concentrés, et que les intensités de pâturage sont également plus importantes dans les systèmes mixtes, le secteur de production des ruminants, en moyenne, requiert moins de surfaces de pâtures et plus de surfaces de cultures. Ce mécanisme est peu présent pour le scénario Ultrap, le régime alimentaire de ce scénario étant caractérisé par un basculement de la demande de produits ruminants vers une demande de produits monogastriques. Ces effets sont exacerbés par l'hypothèse sur la déforestation, qui implique une surface agricole totale (pâtures et cultures) déterminée, la même pour tous les scénarios. Au final, l'ensemble des mécanismes représentés conduit à une réduction des surfaces de pâtures quand les demandes en produits ruminants augmentent, ce qui contraste avec les deux autres modèles.

Les différences de représentation des mécanismes d'intensification entre MATSIM et NLU, avec plus de flexibilités pour les cultures pour MATSIM, et plus de flexibilité pour l'élevage pour NLU, se retrouvent sur les évolutions de prix mondiaux (tableau 5.4). Quel que soit le scénario, les prix mondiaux sont plus faibles pour les cultures pour MATSIM et, le plus souvent, plus faibles pour les produits ruminants pour NLU.

Tableau 5.4. Évolution (%) des indices de prix des cultures et des produits animaux, par scénario, pour MATSIM et NLU (moyennes pondérées par catégorie de produit, de l'année de référence à 2050).

Modèle	MATSIM			NLU ¹		
	Scénario	Cultures	Monogastriques	Ruminants (incluant les produits laitiers)	Cultures	Ruminants (incluant les produits laitiers)
Animp		+ 1,5	+ 2,0	+ 2,8	+ 3,1	+ 1,7
FAO		+ 0,4	+ 1,1	+ 1,8	+ 2,4	+ 1,6
Healthy		- 0,3	+ 0,5	+ 1,1	+ 1,0	+ 1,2
Ultrap		+ 1,0	+ 1,0	+ 1,9	+ 1,8	+ 1,4

¹ Les quantités de produits issus des monogastriques échangées sont fixes en valeur absolue dans NLU, il n'y a donc pas de prix associé.

» Conclusion

Quelle que soit la modélisation utilisée, l'évolution des régimes alimentaires a des impacts significatifs sur les surfaces agricoles dans toutes les régions et au niveau mondial. Les choix de modélisation jouent également un rôle important, quel que soit le scénario de régime alimentaire simulé.

Dans GlobAgri-DietsAgT, un modèle de bilan, seules les quantités s'ajustent, les changements sont très contrastés et potentiellement très importants. Dans les modèles économiques, MATSIM et NLU, les quantités et les prix s'ajustent, ce qui induit des substitutions entre produits et de l'extensification ou de l'intensification des systèmes de production. L'effet stabilisateur des mécanismes de prix dans ce type de modèle réduit les accroissements de surfaces de cultures et de pâtures nécessaires pour répondre aux changements de demande.

Les modèles de bilan de flux de biomasse ont probablement tendance à surestimer les changements d'usage des terres, en tout cas quand les scénarios simulés ne sont pas conçus de façon cohérente sur toutes les dimensions, mais différenciés sur une seule dimension, ici les régimes alimentaires. Ils sont simples, transparents et didactiques, ce qui les rend utiles dans certains contextes (Mora *et al.*, 2020).

L'analyse des résultats des modèles économiques révèle le rôle crucial des mécanismes d'intensification/extensification représentés pour expliquer les évolutions des usages des terres. Ces mécanismes sont modélisés dans MATSIM et NLU, mais les différences de représentation, avec le rendement des cultures plus flexible dans MATSIM et celui des pâtures plus flexible dans NLU, donnent des résultats très variés. Notre étude suggère qu'explicitement les mécanismes en jeu dans les différents modèles et relier les résultats à ces choix de modélisation devrait être systématique, en particulier lorsque l'on analyse les résultats d'un même scénario simulé avec plusieurs modèles. En retour, les résultats seraient plus faciles à comprendre, leurs fragilités et leurs incertitudes plus simples à objectiver, ce qui permettrait de clarifier le débat scientifique.

Notre étude montre également qu'une telle analyse permet de mettre en lumière des éléments cruciaux des scénarios, dans notre cas les évolutions des rendements des pâtures et des cultures, et des efficacités de l'élevage. Les évolutions des rendements des cultures et des pâtures, exogènes dans GlobAgri-DietsAgT, sont ainsi très différentes de celles simulées par MATSIM et NLU. L'explicitation des rendements permet de rendre plus transparente l'analyse des résultats. Elle n'est pourtant pas si fréquemment conduite dans les comparaisons de scénarios mondiaux de transition des systèmes alimentaires. Dévoiler ces différences d'évolution des rendements entre scénarios révélerait en outre la nécessité et l'intérêt d'un dialogue interdisciplinaire sur les changements plausibles des rendements des cultures et des pâtures, que ceux-ci soient des hypothèses (comme dans GloAgri-DietsAgT) ou des résultats de simulation (comme dans MATSIM et NLU). Ces considérations s'étendent d'ailleurs aux évolutions des efficacités de l'élevage, et plus généralement à toute autre variable ou paramètre technique clé des modèles.

►► Remerciements

Cette étude a été conduite dans le cadre du projet TAABCE, qui a été financé par le métaprogramme GloFoodS.

Nous remercions chaleureusement les relecteurs pour leurs commentaires pertinents et pour leurs suggestions. Nous sommes particulièrement reconnaissants pour la relecture précise et approfondie de Bertrand Schmitt et pour ses précieuses suggestions.

►► Références bibliographiques

- Alexandratos, N., Bruinsma, J. (2012). World agriculture towards 2030/2050. The 2012 revision. Technical report, FAO. ESA Working paper No. 12-03. http://typo3.fao.org/fileadmin/templates/esa/Global_perspectives/world_ag_2030_50_2012_rev.pdf
- Brunelle, T., Dumas, P., Souty, F., Dorin, B., Nadaud, F. (2015). Evaluating the impact of rising fertilizer prices on crop yields. *Agricultural Economics*, 46(5), 653–666. <https://doi.org/10.1111/agec.12161>
- Clark, M. A., Domingo, N. G. G., Colgan, K., Thakrar, S. K., Tilman, D., Lynch, J., Azevedo, I. L., Hill, J. D. (2020). Global food systems emissions could preclude achieving the 1.5° and 2°C climate change targets. *Science*, 370, 705–708. <https://doi.org/10.1126/science.aba7357>
- Forslund, A., Levert, F., Gohin, A., Le Mouël, C. (2013). Évaluation des effets du développement des biocarburants en France sur les marchés des grandes cultures et sur le changement d'affectation des sols : une analyse à l'aide du modèle MATSIM-LUCA : résultats des simulations. Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie. {hal-01208886}
- Erb, K.-H., Lauk, C., Kastner, T., Mayer, A., Theurl, M., Haberl, H. (2016). Exploring the biophysical option space for feeding the world without deforestation. *Nature Communications*, 7, 11382. <https://doi.org/10.1038/ncomms11382>
- Hedenus, F., Wirsenius, S., Johansson, D. J. A. (2014). The importance of reduced meat and dairy consumption for meeting stringent climate change targets. *Climatic Change*, 124, 79–91. <https://doi.org/10.1007/s10584-014-1104-5>
- Henry, R. C., Alexander, P., Rabin, S., Anthoni, P., Rounsevell, M. D., Arneth, A. (2019). The role of global dietary transitions for safeguarding biodiversity. *Global Environmental Change*, 58, 101956. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2019.101956>
- Le Mouël, C., de Lattre-Gasquet, M., Mora, O. (Eds.) (2018a). *Land Use and Food Security in 2050: a Narrow Road. Agrimonde-Terra*. Éditions Quae, Versailles.
- Le Mouël, C., Dumas, P., Manceron, S., Forslund, A., Marajo-Petitson, E. (2018b). *The GlobAgri-Agrimonde-Terra database and model*. In Le Mouël, C., de Lattre-Gasquet, M., Mora, O. (Eds.) (2018b). *Land Use and Food Security in 2050: a Narrow Road. Agrimonde-Terra*. Éditions Quae, Versailles, pp. 28–36.
- Le Mouël, C., Forslund, A. (2017). How can we feed the world in 2050? A review of the responses from global scenario studies. *European Review of Agricultural Economics*, 44(4):541–591. <https://doi.org/10.1093/erae/jbx006>
- Le Mouël, C., Forslund, A., Marty, P., Manceron, S., Marajo-Petitson, E., Caillaud, M.-A., Dumas, P., Schmitt B. (2023). Can the Middle East North Africa region mitigate the rise of its food import dependency under climate change? *Regional Environmental Change*, 23, 52 (2023). <https://doi.org/10.1007/s10113-023-02045-y>
- Levert, F., Forslund, A., Hercule, J., Le Mouël, C. (2017). Étude CLAC-LUC, crop-livestock land competition: land use change and greenhouse gas emissions, ministère de l'Alimentation, de l'Agriculture et de la Forêt, 55 p. {hal-01532696}

- Mora, O., Le Mouél, C., de Lattre-Gasquet, M., Donnars, C., *et al.* (2020). Exploring the future of land use and food security: A new set of global scenarios. *PLOS ONE*, 15(7), 1–29. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0235597>
- Paillard, S., Treyer, S., Dorin, B. (Eds.) (2011). *Agrimonde, Scenarios and Challenges for Feeding the World in 2050*. Éditions Quae, Versailles.
- Popp, A., Calvin, K., Fujimori, S. Havlik, P., *et al.* (2017). Land-use futures in the shared socio-economic pathways. *Global Environmental Change*, 42, 331–345. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2016.10.002>
- Prudhomme, R., Brunelle, T., Dumas, P., Le Moing, A., Zhang, X. (2020a). Assessing the impact of increased legume production in Europe on global agricultural emissions. *Regional Environmental Change*, 20, 91. <https://doi.org/10.1007/s10113-020-01651-4>
- Prudhomme, R., Palma, A. D., Dumas, P., Gonzalez, R., *et al.* (2020b). Combining mitigation strategies to increase co-benefits for biodiversity and food security. *Environmental Research Letters*, 15(11), 114005. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/abb10a>
- Salou, T., Le Mouél, C., Levert, F., Forslund, A., van der Werf, H. (2019). Combining life cycle assessment and economic modelling to assess environmental impacts of agricultural policies: the case of the French ruminant sector. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 24(3), 566–580.
- Searchinger, T., Waite, R., Hanson, C., Ranganathan, J., Dumas, P. (2019). Creating a sustainable food future. World resources report, World Resources Institute. <https://www.wri.org/publication/creating-sustainable-food-future-final-report>
- Souty, F., Brunelle, T., Dumas, P., Dorin, B., Ciais, P., Crassous, R., Müller, C., Bondeau, A. (2012). The nexus land-use model version 1.0, an approach articulating biophysical potentials and economic dynamics to model competition for land-use. *Geoscientific Model Development*, 5(5), 1297–1322. <https://doi.org/10.5194/gmd-5-1297-2012>
- Souty, F., Dorin, B., Brunelle, T., Dumas, P., Ciais P. (2013). Modelling economic and biophysical drivers of agricultural land-use change: calibration and evaluation of the Nexus Land-Use model over 1961–2006. *Geoscientific Model Development Discussions*, 6(4), 6975–7046. <https://doi.org/10.5194/gmdd-6-6975-2013>
- Stehfest, E., Bouwman, L., Van Vuuren, D. P., den Elzen, M. G. J., Eickhout, B., Kabat, P. (2009). Climate benefits of changing diet. *Climatic Change*, 95(1–2), 83–102. <https://doi.org/10.1007/s10584-008-9534-6>
- Stevanović, M., Popp, A., Bodirsky, B. L., Humpenöder, F., *et al.* (2017). Mitigation strategies for greenhouse gas emissions from agriculture and land-use change: Consequences for food prices. *Environmental Science & Technology*, 51(1), 365–374. <https://doi.org/10.1021/acs.est.6b04291>
- von Lampe, M., Willenbockel, D., Ahammad, H., Blanc, E., *et al.* (2014). Why do global long-term scenarios for agriculture differ? An overview of the AgMIP global economic model intercomparison. *Agricultural Economics*, 45(1), 3–20. <https://doi.org/10.1111/agec.12086>
- Willett, W., Rockström, J., Loken, B., Springmann, M., *et al.* (2019). Food in the Anthropocene: the EAT–Lancet commission on healthy diets from sustainable food systems. *The Lancet*, 393(10170), 447–492. [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(18\)31788-4](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(18)31788-4)